



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NÁVRH A VÝVOJ UNIVERZÁLNÍHO NAPÁJECÍHO ZDROJE NOTEBOOKŮ DO SOUČASNÝCH MOTOROVÝCH VOZIDEL

A DESIGN AND DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL POWER SUPPLY FOR LAPTOPS IN
CONTEMPORARY MOTOR VEHICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Cagáň

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Štáva, Ph.D.

BRNO 2021



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Adam Cagáň

ID: 195290

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a vývoj univerzálního napájecího zdroje notebooků do současných motorových vozidel

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a sestavte univerzální zdroj pro napájení různých notebooků s výkonem 60 až 120 W do různých motorových vozidel se stejnosměrným bateriovým rozvodem o jmenovitém napětí 6, 12, 24, 36 a 48 V. Napájecí napětí pro notebooky je nastavitelné v rozsahu od 16 V do 24 V, popř. i více.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 3.6.2021

Vedoucí práce: Ing. Martin Štáva, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá návrhom a zhotovením napájacieho zdroja s nastaviteľným výstupným napätím v rozsahu 15 až 30 V, ktorého hlavnou časťou je DC/DC menič, pracujúci v topológii buck-boost. Práca sa venuje výberu vhodného riadiaceho obvodu DC/DC meniča a výpočtu potrebných hodnôt externých súčiastok. Navrhnutý menič je vybavený ochranou voči prepätiu, reverznej polarite vstupného napätia a ochranou voči skratu. Menič je doplnený mikrokontrolérom, displejom a rotačným enkodérom, ktoré umožňujú jednoduché ovládanie zariadenia. V závere sa práca venuje porovnaniu dosiahnutých parametrov v simulácii a v praxi.

Kľúčové slová

DC/DC menič, napájací zdroj, návrh buck-boost meniča, vstupná ochrana, mikrokontrolér

Abstract

This thesis deals with design of DC power supply with adjustable output voltage in range of 15 to 30 V, working in buck-boost topology. Thesis explains selection of buck-boost controller integrated circuit and calculation of values of external components. Designed converter is supplied with overvoltage, overcurrent, and reverse voltage protection circuit. Final circuit is equipped with microcontroller, display, and rotary encoder, which make it easily operable. Further, there are compared parameters of the device achieved in simulation and in practice.

Keywords

DC/DC converter, power supply, buck-boost converter design, input protection, microcontroller

Bibliografická citácia:

CAGÁŇ, Adam. *Návrh a vývoj univerzálného napájacieho zdroje notebooků do současných motorových vozidel*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134668>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Ing. Martin Šťáva, Ph.D..

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta:	<i>Adam Cagáň</i>
VUT ID študenta:	<i>195290</i>
Typ práce:	<i>Bakalárska práca</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma záverečnej práce:	<i>Návrh a vývoj univerzálného napájacieho zdroje notebooků do současných motorových vozidel</i>

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, vyslovene som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 3. júna 2021

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Martinovi Šťávrovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa: 3. júna 2021

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	11
ÚVOD	12
1. MOŽNOSTI RIEŠENIA.....	13
1.1 POUŽITIE HOTOVÉHO MENIČA	13
1.2 NÁVRH A ZHOTOVENIE VLASTNÉHO MENIČA.....	13
2. ÚVOD K DC/DC MENIČOM.....	15
2.1 DELENIE MENIČOV	15
2.2 PRINCÍP FUNKCIE.....	15
2.2.1 BUCK menič	16
2.2.2 BOOST menič.....	17
2.2.3 BUCK-BOOST menič.....	18
2.3 MENIČE S DIÓDOVÝM A SYNCHRÓNNYM USMERŇOVAČOM	19
3. SPÔSOBY DIGITÁLNEHO NASTAVENIA VÝSTUPNÉHO NAPÄTIA DC/DC MENIČA	20
3.1 D/A PREVODNÍK.....	20
3.2 DIGITÁLNY POTENCIOMETER.....	21
3.3 PWM SIGNÁL	22
4. VÝBER RIADIACEHO OBVODU MENIČA.....	23
4.1 POROVNANIE DOSTUPNÝCH RIADIACICH OBVODOV	23
5. NÁVRH S LT8390.....	25
5.1 URČENIE PRACOVNÝCH PARAMETROV	25
5.2 VÝBER SPÍNACÍCH TRANZISTOROV	26
5.3 VÝBER CIEVKY	26
5.4 VÝBER VSTUPNÝCH A VÝSTUPNÝCH KONDENZÁTOROV	27
5.5 VÝBER OSTATNÝCH SÚČIASTOK OBVODU.....	28
5.6 SIMULÁCIA OBVODU	29
5.6.1 Vplyv vnútorného sériového odporu zdroja na funkciu meniča	29
5.6.2 Simulácia režimu boost pri zmene napätia zo 6 na 30 V.....	31
5.6.3 Simulácia režimu buck pri zmene napätia zo 48 na 30 V.....	32
5.6.4 Porovnanie výsledkov	34
6. NÁVRH VSTUPNEJ OCHRANY	35
6.1 NÁVRH S LTC4380-4	35
6.2 OVERENIE FUNKCIE VSTUPNEJ OCHRANY POMOCOU SIMULÁCIE	37
6.2.1 Simulácia funkcie prepäťovej ochrany.....	38
6.2.2 Simulácia funkcie nadprúdovej ochrany.....	41
6.2.3 Simulácia ochrany proti reverznej polarite napájania	42
7. VYUŽITIE MIKROKONTROLÉRU ARDUINO	44
7.1 VÝBER MODULU A OSTATNÝCH KOMPONENTOV	44
7.2 NASTAVENIE VÝSTUPNÉHO NAPÄTIA POMOCOU D/A PREVODNÍKU	44
7.3 PROGRAM PRE ARDUINO	45
7.4 NAPÁJANIE MIKROKONTROLÉRU A PERIFÉRIÍ	45
7.5 MOŽNÉ ZLEPŠENIE EFEKTIVITY A RIADENIE VÝKONU MENIČA	46
8. REALIZÁCIA ZARIADENIA.....	47
8.1 NÁVRH DPS	47
8.2 OSADENIE SÚČIASTOK.....	48

8.3	PUZDRO.....	48
8.4	KONEKTORY K ZARIADENIU	49
9.	PRAKTICKÉ OVERENIE FUNKCIE	50
9.1	ÚČINNOSŤ ZARIADENIA	50
9.2	ZVLNENIE VÝSTUPNÉHO NAPÄTIA	52
9.3	VSTUPNÁ OCHRANA	53
10.	ZÁVER.....	54
	LITERATÚRA	56
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	59
	ZOZNAM PRÍLOH.....	61

ZOZNAM OBRÁZKOV

2.1	Funkcia DC/DC meniča, prekreslené z [1].....	15
2.2	Schéma znižujúceho meniča a časové priebehy prúdov a napätí v obvode, prevzaté z [3].....	16
2.3	Principiálna schéma zvyšujúceho meniča a priebehy prúdov a napätí v obvode, prevzaté z [3]	17
2.4	Principiálna schéma zvyšujúco-znižujúceho meniča, prevzaté z [3].....	18
3.1	Zapojenie D/A prevodníku v obvode spätnej väzby, prekreslené z [5].....	20
3.2	Zapojenie digitálneho potenciometru v obvode spätnej väzby, prekreslené z [5].....	21
3.3	Zapojenie zdroja PWM signálu a filtra typu DP v obvode spätnej väzby, prekreslené z [5]	22
5.1	Schéma obvodu DC/DC meniča v programe LTspice	29
5.2	Charakteristika reálneho zdroja napätia, prekreslené z [17].....	30
5.3	Časový priebeh výstupného napätia a prúdu cievkou v boost režime s výstupným napätím 30 V ...	31
5.4	Časové priebehy spínacích signálov a prúdu cievkou pre boost režim s výstupným napätím 30 V ..	31
5.5	Časové priebehy vstupného a výstupného napätia a prúdu v boost režime s výstupným napätím 30 V	32
5.6	Časový priebeh výst. napätia a prúdu cievkou pre buck režim s výstupným napätím 30 V	33
5.7	Časové priebehy spínacích signálov a prúdu cievkou v buck režime s výstupným napätím 30 V	33
5.8	Časové priebehy vstupného a výstupného prúdu a napätia v buck režime s výstupným napätím 30 V	34
6.1	Navrhnutý obvod vstupnej ochrany s LTC4380-4	38
6.2	Charakteristika napäťového pulzu v automobilových rozvodoch, prevzaté z [20]	39
6.3	Sledované veličiny prepäťovej ochrany po privedení pulzu s parametrami pre rozvod s nominálnym napätím $U_n = 12$ V.....	40
6.4	Sledované veličiny prepäťovej ochrany po privedení pulzu s parametrami pre rozvod s nominálnym napätím $U_n = 24$ V.....	40
6.5	Sledované veličiny nadprúdovej ochrany so vstupným napätím 6 V po pripojení nízkej impedancie	41
6.6	Sledované veličiny nadprúdovej ochrany so vstupným napätím 48 V po pripojení nízkej impedancie	42
6.7	a) Sledované veličiny ochrany proti reverznej polarite napájania pri zmene napätia zo 6 na -60 V, b) zväčšený úsek v čase prechodu vstupného napätia nulou	42
6.8	Sledované veličiny ochrany proti reverznej polarite napájania pri zmene napätia zo 0 na -60 V	43
7.1	Zapojenie D/A prevodníku MCP4725 v obvode spätnej väzby navrhnutého DC/DC meniča	45
7.2	Zobrazované menu a jeho položky, zľava: hlavné menu, voľba značky laptopu, nastavenie požadovaného napätia	45
8.1	Prehľad vrstiev navrhutej DPS, horný rad zľava: prvá (vrchná) a druhá vrstva, dolný rad zľava: tretia a štvrtá (spodná) vrstva	47
8.2	Vrchná a spodná strana osadenej DPS	48
8.3	Zariadenie umiestnené v navrhnutom puzdre.....	48
8.4	Konektory k zariadeniu: a) vstupný konektor pre 12 V rozvody, b) výstupný konektor, c) sada konektorov k notebookom.....	49
9.1	Závislosť účinnosti na vstupnom napätí pre výstupné napätie 15 V	50
9.2	Závislosť účinnosti na vstupnom napätí pre výstupné napätie 30 V	51
9.3	Zvlnenie výstupného napätia 30 V pri vstupnom napätí 6 V	52
9.4	Zvlnenie výstupného napätia 30 V pri vstupnom napätí 48 V	52

ZOZNAM TABULIEK

5.1	Požadované parametre spínacích tranzistorov.....	26
5.2	Porovnanie sledovaných parametrov v simulácii	34
6.1	Parametre napät'ového pulzu v testovaných napätiach rozvodov, prevzaté z [20]	39
9.1	Namerané hodnoty účinností meniča v praxi a v simulácii pri výstupnom napätí 15 V	51
9.2	Namerané hodnoty účinností meniča v praxi a v simulácii pri výstupnom napätí 30 V	51
9.3	Hodnoty zvlnenia výstupného napätia v závislosti na zmene napätia	53

ÚVOD

V dnešnej dobe sa počítače využívajú do takej miery, že vykonávať niektoré aktivity bez ich využitia by bolo veľmi náročné, alebo dokonca nemožné. Vďaka technologickému pokroku sa čoraz viac dostávajú do popredia prenosné počítače, takzvané notebooky. Notebooky sú vybavené batériou, čo umožňuje ich použitie aj tam, kde nie je prístup k napájacej sieti. Batérie však majú obmedzenú výdrž, ktorá obmedzuje funkciu notebooku bez elektrickej siete na niekoľko hodín. Následne je nutné notebook pripojiť do elektrickej siete a nechať batériu určitý čas nabiť.

Z tohto dôvodu boli vyvinuté napájacie zdroje schopné napájať notebook z palubnej siete automobilu. Takéto zariadenie určite využijú vodiči nákladnej dopravy, rôzni terénni pracovníci, ale aj široká verejnosť. Na trhu je možné bežne zohnať meniče, ktoré upravujú napätie automobilového rozvodu na štandardné napätie 5 V, potrebné na nabíjanie tabletu alebo mobilu. V prípade napájacích zdrojov pre notebooky, je situácia zložitejšia, už len z toho dôvodu, že notebooky rôznych značiek vyžadujú rôzne napájacie napätie.

Táto práca je zameraná na návrh zariadenia, ktoré bude kompatibilné z väčšinou typov notebookov, napájacie napätie si zvolí užívateľ na základe svojho modelu. Navyše bude toto zariadenie schopné pracovať nielen s 12 V palubnou sieťou, ale s rôznymi veľkosťami napätí v rozsahu 6 až 48 V. Zároveň kladie dôraz na funkčnosť zariadenia z pohľadu užívateľa, teda z hľadiska kompaktnosti a jednoduchosti používania.

1. MOŽNOSTI RIEŠENIA

Základným blokom celého zariadenia je obvod slúžiaci k zmene vstupného napätia na požadovanú hodnotu výstupného napätia. Existujú dve možnosti ako tento obvod získať. Prvá možnosť je kúpiť hotový DC/DC menič, vhodný pre túto aplikáciu. Druhá možnosť je tento menič navrhnuť tak, aby spĺňal požadované parametre a zhotoviť ho.

1.1 Použitie hotového meniča

Na trhu existuje nespočetné množstvo rôznych druhov meničov s rôznymi parametrami. Pri výbere konkrétneho produktu v internetových obchodoch je problémom nedostatočná, alebo vôbec žiadna možnosť filtrovania produktov podľa parametrov. Určitú možnosť filtrovania sortimentu ponúkajú distribútori ako Mouser Electronics alebo Digi-Key Electronics. V online katalógu prvého spomenutého distribútora sa objavil problém s veľmi všeobecnou možnosťou filtrovania, čoho výsledkom bolo zobrazenie veľkého množstva produktov, z veľkej väčšiny nevyhovujúcich. Najst' práve ten vyhovujúci by vyžadovalo prechádzanie produktov jednotlivu a vylučovacou metódou zvoliť vhodný produkt. U druhého spomenutého distribútora bolo možné pomocou filtrovania podľa rozsahu vstupného napätia zúžiť ponuku na niekoľko typov meničov, ani jeden však nebol vyhovujúci z hľadiska rozsahu výstupného napätia.

Podobná situácia nastáva u lokálnych predajcov, ako sú GM Electronic, alebo GES Electronics. Možnosť filtrovania je prakticky minimálna, dajú sa filtrovať produkty len podľa použitia. Zároveň je ponuka produktov pomerne úzka, takže nie je problém prejsť produkty jednotlivu a sledovať parametre. Napriek tejto možnosti sa u lokálnych predajcov nepodarilo nájsť vhodný menič.

Ďalší spôsob ako zaobstarat' hotový menič, je nákup v internetových obchodoch typu Amazon alebo eBay. Nevýhodou je úplná absencia možnosti filtrovania, vyhľadávanie je možné len pomocou zadaného reťazca. Aj tu nastáva problém so zobrazením veľkého množstva prevažne nevyhovujúcich produktov s nutnosťou prechádzať produkty jednotlivu.

Výhodou týchto meničov je predovšetkým cena, ale aj kompaktnosť meniča, ktorá je častokrát na dobrej úrovni na úkor kvality spracovania. Nevýhodou je neznáma odolnosť meniča a žiadna garancia deklarovaných parametrov. Všetko, o čom predajca na týchto portáloch informuje, je len strohý popis zariadenia so základnými špecifikáciami, ktoré nie je možné žiadnym spôsobom overiť. V neposlednom rade prevažná väčšina takýchto zariadení nedisponuje žiadnymi ochranami, ako sú ochrana proti prepätiu, reverznému napätiu, alebo ochrana proti skratovaniu výstupu. To znamená, že by bolo potrebné takéto zariadenie patrične upraviť vrátane návrhu takýchto ochranných obvodov.

1.2 Návrh a zhotovenie vlastného meniča

Návrh vlastného meniča má oproti použitiu hotového meniča radu výhod. Výberom vhodného riadiaceho obvodu je možné mať kvalitu a parametre plne pod kontrolou a zároveň docieľiť väčšiu kompaktnosť zariadenia umiestnením celého systému na jednu DPS. Riadiacích obvodov je na trhu mnoho a je pomerne jednoduchšie zvoliť vhodný riadiaci obvod než hotový menič. Rôzne druhy riadiacich integrovaných obvodov s rôznymi parametrami ponúkajú známi výrobcovia, ako napríklad Texas Instruments

alebo Analog Devices. Výhodou tohto riešenia je fakt, že výrobcovia ku každému obvodu poskytujú katalógový list s garantovanými parametrami a rôznymi odporúčaniami návrhu vrátane výberu externých súčiastok. Veľa výrobcov dodáva ku svojim produktom ich simulačné modely, alebo iné nástroje vhodné na zjednodušenie a vyladenie návrhu obvodu. Ďalšou výhodou vlastného návrhu je jednoduchšia integrácia doplnujúcich komponentov, ktorými môžu byť ochranné obvody alebo mikrokontrolér.

Nevýhodou tejto možnosti riešenia je náročnejšie spracovanie spojené s väčšími peňažnými nákladmi, keďže sa nejedná o sériovú výrobu.

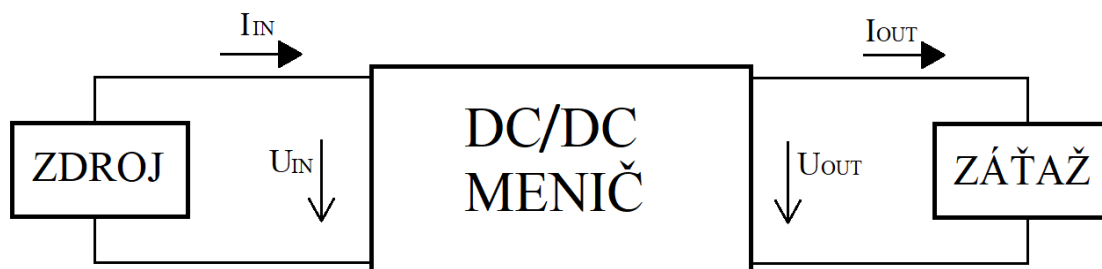
Vzhľadom na pomerne zložitý výber dostupných produktov v internetových obchodoch bola zvolená možnosť vlastného návrhu, aj vďaka možnosti väčšieho prispôsobenia navrhnutého zariadenia svojim požiadavkám.

2. ÚVOD K DC/DC MENIČOM

DC/DC menič je druh spínaného zdroja, ktorý mení vstupné napätie U_{IN} a vstupný prúd I_{IN} na napätie U_{OUT} a prúd I_{OUT} . Teoreticky sa výstupný výkon rovná vstupnému výkonu. V praxi je výstupný výkon spravidla menší ako vstupný, kvôli tepelným stratám na rôznych prvkoch obvodu. Pomer výstupného výkonu ku vstupnému udáva účinnosť η , ktorú je možné určiť vzťahom

$$\eta = \frac{U_{OUT} \cdot I_{OUT}}{U_{IN} \cdot I_{IN}} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}}. \quad (2.1)$$

Meniče bežne dosahujú účinnosť v rozsahu: $60\% \leq \eta \leq 95\%$. [1]



Obrázok 2.1 Funkcia DC/DC meniča, prekreslené z [1]

2.1 Delenie meničov

Z pohľadu zmeny vstupného napätia na výstupné napätie delíme meniče na:

- Boost – nazývané tiež step-up, sú zvyšujúce meniče, ktoré sa používajú v prípade, ak je na výstupe požadované väčšie napätie ako vstupné napätie
- Buck – nazývajú sa step-down, sú meniče znižujúce, tento typ generuje na výstupe menšie napätie ako na vstupe
- Buck-boost – znižujúco-zvyšujúce meniče sa používajú v prípade, ak sa na vstupe môže vyskytnúť menšie aj väčšie napätie oproti požadovanej výstupnej hodnote

2.2 Princíp funkcie

Obvody meničov sa skladajú zo spínacej časti a výkonovej časti. Spínaciu časť tvorí prevažne integrovaný obvod s doplnujúcimi diskretnými súčiastkami. Vo výkonovej časti sa nachádza tranzistor, akumulčné prvky (induktor alebo kondenzátor) a ďalšie pasívne súčiastky. Spínací obvod generuje obdĺžnikový signál, ktorý otvára a zatvára výkonový tranzistor. Spínací obvod na základe spätnej väzby z výstupu upravuje striedu signálu a tým mení dobu otvorenia a dobu zatvorenia tranzistoru.

2.2.1 BUCK menič

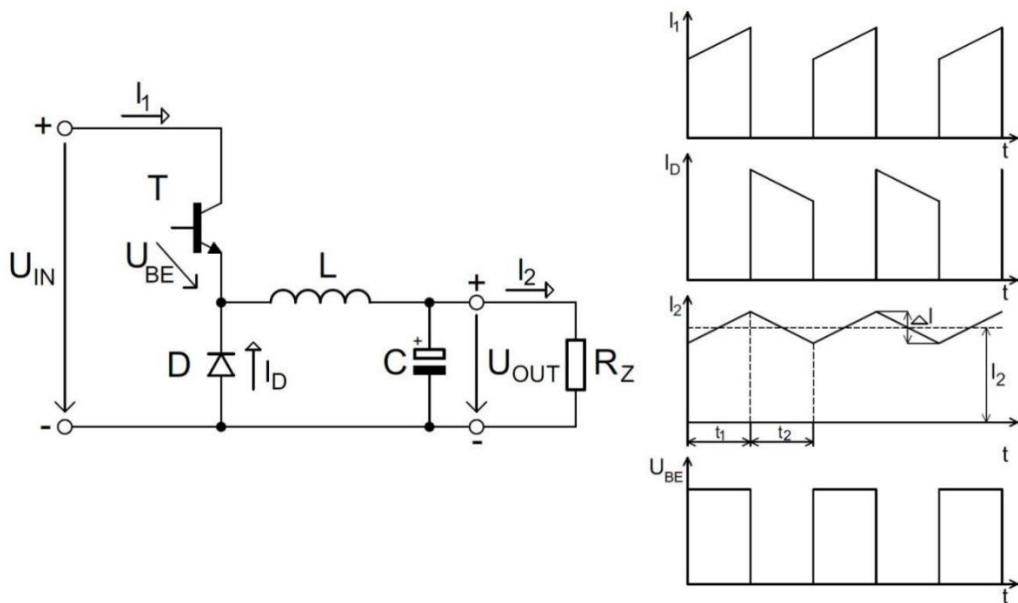
Buck menič, step-down, alebo znižujúci menič je typ meniča ktorý má na výstupe menšie napätie ako na vstupe. Výstupné napätie, ak je zanedbaný úbytok napätia na usmerňovacej dióde, je rovné napätiu indukovanému na induktore L [2].

$$U_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt}. \quad (2.2)$$

Strieda spínania D (duty cycle) sa rovná pomeru výstupného a vstupného napätia a nadobúda hodnoty v rozsahu (0;1).

$$D = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{t_{ON}}{t_{ON}+t_{OFF}} = \frac{t_{ON}}{T}. \quad (2.3)$$

Principiálna schéma s časovými priebehmi sledovaných veličín je na obrázku 2.2.



Obrázok 2.2 Schéma znižujúceho meniča a časové priebehy prúdov a napätí v obvode, prevzaté z [3]

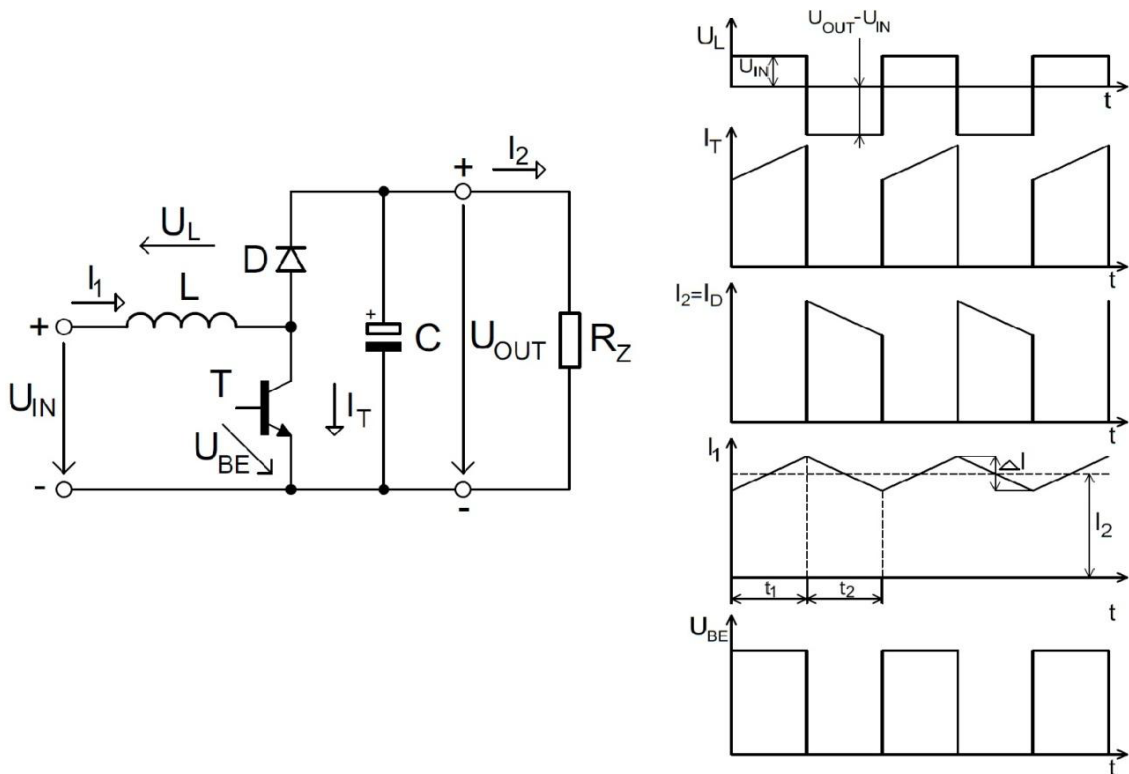
Obvod pracuje v dvoch intervaloch:

1. V momente otvorenia tranzistoru T (interval t_1 , označovaného tiež ako t_{on}), tečie prúd zo zdroja tranzistorom T, induktorom L, v ktorom sa akumuluje energia v magnetickom poli, tento prúd rastie až do momentu vypnutia tranzistoru T. Prúd ďalej tečie do záťaže R_Z a zároveň nabíja kondenzátor C. Následne tečie späť do zdroja U_{IN} . Dióda D je polarizovaná v závernom smere a prúd ňou netečie.
2. Na začiatku intervalu t_2 sa tranzistor T zavrie, naakumulovaná energia v magnetickom poli induktora sa mení späť na prúd a induktor funguje ako zdroj. So znižovaním množstva energie v magnetickom poli induktora sa znižuje generovaný prúd. Prúd, ktorý má rovnaký smer ako prúd v intervale t_1 , tečie z induktora do záťaže R_Z a cez diódu D, polarizovanú v priepustnom smere. Prúdová cesta sa uzatvára späť v induktore L. Kondenzátor C taktiež dodáva prúd to záťaže, a tým znižuje výstupné zvlnenie.

2.2.2 BOOST menič

Tento typ meniča, nazývaný tiež step-up, má na výstupe vždy väčšie napätie ako na vstupe. Vyplýva to zo sériového zapojenia induktora a vstupného zdroja napätia v schéme na obrázku 2.3. Napätie indukované na induktore podľa rovnice 2.2 sa pričíta k vstupnému napätiu na zdroji U_{IN} . Potom je výstupné napätie rovné súčtu týchto napätí. Strieda spínania je rovná

$$D = 1 - \frac{U_{IN}}{U_{OUT}} = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{t_{ON}}{T}. \quad (2.4)$$



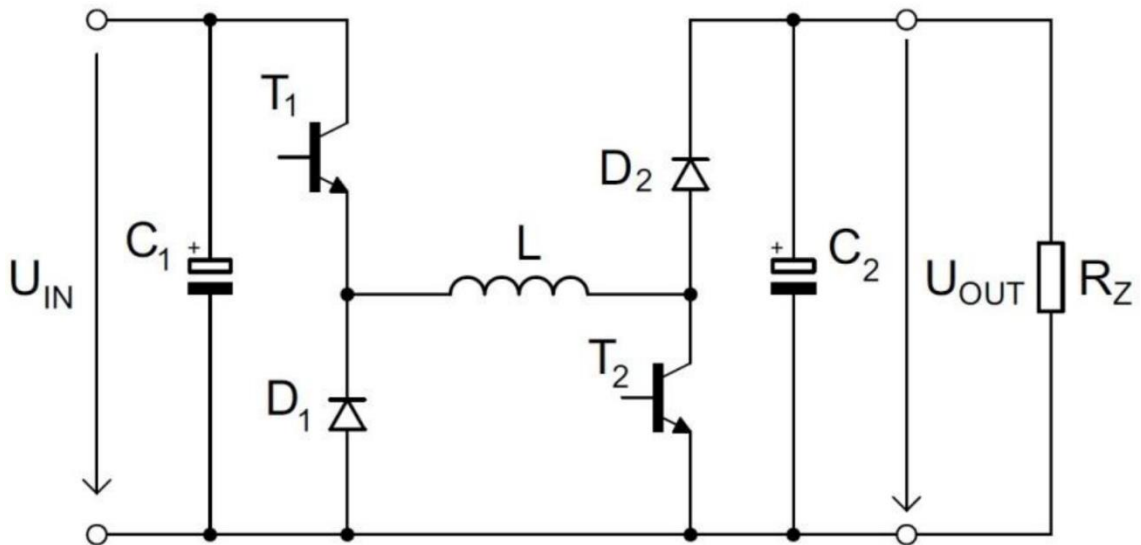
Obrázok 2.3 Principiálna schéma zvyšujúceho meniča a priebehy prúdov a napätí v obvode, prevzaté z [3]

Princíp funkcie:

1. V momente otvorenia tranzistoru T prechádza prúd zo zdroja U_{IN} cez induktor L a tranzistor T späť do zdroja. V tomto intervale (interval t_1) sa v magnetickom poli induktora L akumuluje energia a prúd sa postupne zväčšuje. Zároveň sa kondenzátor C, nabitý z predošlého cyklu, vybíja do záťaže. Dióda D je polarizovaná v závernom smere a zabraňuje tak vybitiu kondenzátora cez tranzistor T.
2. V momente vypnutia tranzistoru T (interval t_2) sa na induktore začne indukovať kladné napätie U_L . Induktor funguje ako zdroj prúdu, ktorý tečie diódou D, polarizovanou v priepustnom smere do záťaže R_Z a zároveň nabíja kondenzátor C.

2.2.3 BUCK-BOOST menič

Menič schopný zvyšovať aj znižovať vstupné napätie. Vznikol spojením funkcií znižujúceho a zvyšujúceho meniča.



Obrázok 2.4 Principiálna schéma zvyšujúco-znižujúceho meniča, prevzaté z [3]

Funkciu obvodu je možné rozdeliť na dva režimy. Ak je vstupné napätie väčšie ako požadované výstupné napätie, obvod funguje v znižujúcom režime a ak je vstupné napätie menšie ako požadované výstupné napätie, obvod funguje ako zvyšujúci menič. Rovnako ako meniče popísané v kapitolách 2.2.1 a 2.2.2, aj tento menič pracuje v dvoch intervaloch t_1 a t_2 .

V režime znižovania napätia je obdĺžnikový signál z riadiaceho obvodu privedený na hradlo (bázu) tranzistoru T_1 a tranzistor T_2 je trvalo zatvorený. V intervale t_1 je tranzistor T_1 otvorený, prúd tečie induktorom L , diódou D_2 do záťaže R_Z a späť do zdroja. Prúd nabíja kondenzátor C_2 a zároveň sa v induktore L akumuluje energia. Dióda D_1 je polarizovaná v závernom smere a prúd ňou netečie. V intervale t_2 je tranzistor T_1 zatvorený, napätie na induktore sa snaží udržať pôvodný smer prúdu a induktor funguje ako zdroj. Prúd tečie z induktora L diódou D_2 do záťaže R_Z a diódou D_1 , polarizovanou v priepustnom smere späť do induktora L . Kondenzátor C_2 vyrovnáva výstupné zvlnenie napätia.

V režime zvyšovania napätia je tranzistor T_1 trvalo otvorený a signál je privedený na tranzistor T_2 . V intervale t_1 tečie prúd zo zdroja tranzistorom T_1 induktorom L , v ktorom sa akumuluje energia, cez tranzistor T_2 späť do zdroja. Kondenzátor C_2 , ktorý je nabitý z predošlého cyklu dodáva prúd do záťaže R_Z . V intervale t_2 sa tranzistor T_2 zavrie, induktor funguje ako zdroj a tlačí prúd cez diódu D_2 do záťaže R_Z a nabíja kondenzátor C_2 . Veľkosť výstupného napätia U_{OUT} je rovná súčtu napätia zdroja U_{IN} a napätia na induktore U_L .

2.3 Meniče s diódovým a synchronným usmerňovačom

Existujú dva spôsoby usmernenia výstupného prúdu meniča. Prvý spôsob je použitie usmerňovacej diódy, tak ako je to zobrazené vo vyššie spomenutých meničoch, čím vznikne menič s diódovým usmerňovačom. Druhá možnosť je diódy nahradiť tranzistormi, ktoré budú spínať vo vhodných časových intervaloch, a tým vznikne menič so synchronným usmerňovačom. Výhodou diódového usmerňovača je jeho jednoduchosť a menšie nároky na riadiaci obvod, na úkor väčších vodivostných strát, zatiaľ čo synchronný usmerňovač vyžaduje externé budenie tranzistorov, ale je ním možné dosiahnuť vyššiu efektívnosť meniča [4].

Celkový stratový výkon diódového usmerňovača je daný vodivostnými stratami P_C , ktoré je možné rozdeliť na dve časti. Prvá časť je spôsobená úbytkom napätia na dióde U_F a strednou hodnotou prechádzajúceho prúdu I_{AV} . Druhú časť tvoria straty spôsobené tokom prúdu s efektívnou hodnotou I_{RMS} dynamickým odporom diódy r_D . [4]

$$P_C = U_F \cdot I_{AV} + r_D \cdot I_{RMS}^2 . \quad (2.5)$$

Pri použití synchronného usmerňovača spôsobujú stratový výkon dva druhy strát. Pre zjednodušenie je uvažovaný tranzistor typu MOSFET. Prvý druh sú vodivostné straty, ktoré vznikajú prechodom prúdu s efektívnou hodnotou I_{RMS} kanálom tranzistoru s odporom R_{DSon} [4].

$$P_C = R_{DSon} \cdot I_{RMS}^2 . \quad (2.6)$$

Druhý druh sú straty spôsobené ochrannou dobou (dead time). Ak by vrchný a spodný tranzistor boli otvorené v rovnakom čase, spôsobilo by to skrat buď napájacieho zdroja alebo výstupu meniča. Preto je otvorenie spodného a zatvorenie horného tranzistoru, a opačná zmena, oneskorené o ochrannú dobu t_{DT} . Táto doba je výlučne daná použitým riadiacim obvodom. Počas tejto doby, keď sú oba tranzistory zatvorené, tečie prúd parazitnou diódou horného tranzistoru, a spôsobuje straty dané úbytkom napätia na tejto dióde U_F , veľkosťou priemernej hodnoty tohto prúdu I_{AV} , dĺžkou ochrannej doby t_{DT} a frekvenciou spínania f_{SW} [4].

$$P_{DT} = U_F \cdot I_{AV} \cdot 2 \cdot t_{DT} \cdot f_{SW} . \quad (2.7)$$

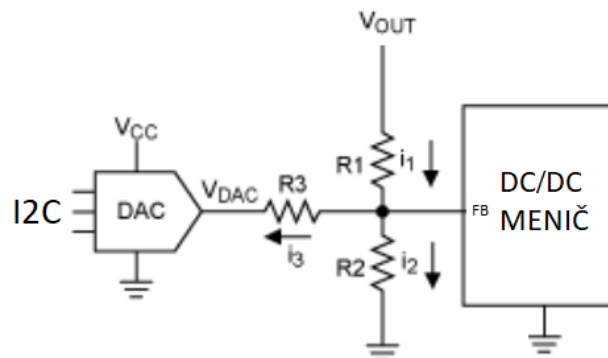
3. SPÔSOBY DIGITÁLNEHO NASTAVENIA VÝSTUPNÉHO NAPÄTIA DC/DC MENIČA

Aby mohol DC/DC menič udržiavať na výstupe konštantné napätie, musí toto napätie monitorovať a v prípade jeho zmeny upraviť striedu spínania. To funguje na princípe negatívnej spätnej väzby. Menič využíva spätnoväzobnú slučku tvorenú z vnútornej časti zabudovanej v integrovanom obvode a vonkajšej časti. Práve vonkajšia časť obvodu spätnej väzby je rozhodujúca pri nastavovaní požadovaného výstupného napätia návrhárom alebo užívateľom.

Vonkajšiu časť slučky tvorí odporový delič napätia. Výstupné napätie podelené v určitom pomere je privedené na vývod FB a porovnávané s napäťovou referenciou radiaceho obvodu. Z toho vyplýva, že pri známej hodnote napäťovej referencie je možné vhodným deliacim pomerom odporového deliča nastaviť požadované výstupné napätie. V prípade potreby zmeny výstupného napätia je nutné zmeniť deliaci pomer deliča alebo zmeniť prúdové pomery v obvode spätnej väzby. Túto zmenu je možné vykonať buď na analógovom princípe, napríklad využitím potenciometru, alebo digitálne. Spôsoby digitálneho nastavenia a súčiastky, ktoré využívajú sú popísané nižšie.

3.1 D/A prevodník

D/A prevodník je integrovaný obvod, ktorý prevádza digitálny signál na analógový signál. V tomto využití je túto súčiastku možné popísať ako digitálne riadený zdroj napätia. Medzi najdôležitejšie vlastnosti D/A prevodníkov patrí rozsah výstupného napätia a rozlíšenie udávané v bitoch. Počet možných hodnôt výstupného napätia je rovný 2^N , kde N je počet bitov. To znamená, že prevodník s rozlíšením 8 bitov a rozsahom výstupného napätia 0 až 5 V dokáže na vstupe nastaviť napätie s presnosťou približne 20 mV. Pre digitálne ovládanie výstupného napätia DC/DC meniča sa používa zapojenie prevodníku v spätnej väzbe podľa obrázku 3.1. [5]



Obrázok 3.1 Zapojenie D/A prevodníku v obvode spätnej väzby, prekreslené z [5]

Funkciu obvodu je možné s využitím Kirchoffových zákonov a Ohmovho zákona popísať nasledujúcimi rovnicami.

$$U_{OUT} = U_{REF} + i_1 \cdot R_1, \quad (3.1)$$

kde U_{REF} je referenčné napätie riadiaceho obvodu. Súčet prúdov vstupujúcich a vystupujúcich z uzla FB je rovný nule, z toho vyplýva, že

$$i_1 = i_2 + i_3 . \quad (3.2)$$

Prúd i_2 je konštantný a daný pomerom referenčného napätia a odporu rezistoru R_2

$$i_2 = \frac{U_{REF}}{R_2} . \quad (3.3)$$

Prúd i_3 je závislý na nastavenom výstupnom napätí D/A prevodníku U_{DAC} [5]

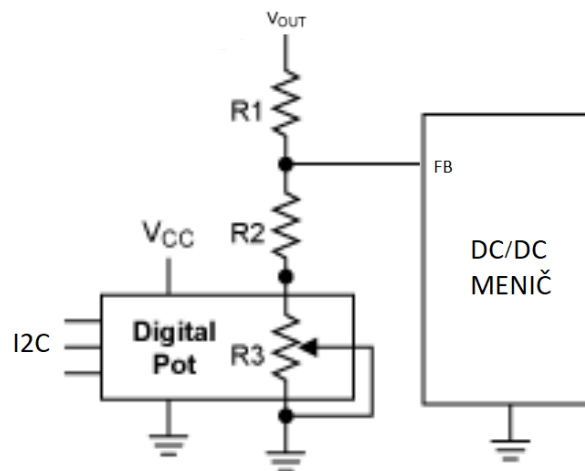
$$i_3 = \frac{(U_{REF} - U_{DAC})}{R_3} . \quad (3.4)$$

Výstupné napätie meniča súčtom dvoch zložiek [5]

$$U_{OUT} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + (U_{REF} - U_{DAC}) \cdot \frac{R_1}{R_3} . \quad (3.5)$$

3.2 Digitálny potenciometer

Digitálny potenciometer je možné v skratke popísať ako rezistor s digitálne riadeným odporom. Je charakterizovaný odporom posuvníku, maximálnym odporom, rozsahom pracovného napätia a počtom krokov. Jeho použitie sa líši od použitia D/A prevodníku v spôsobe zapojenia. [5]



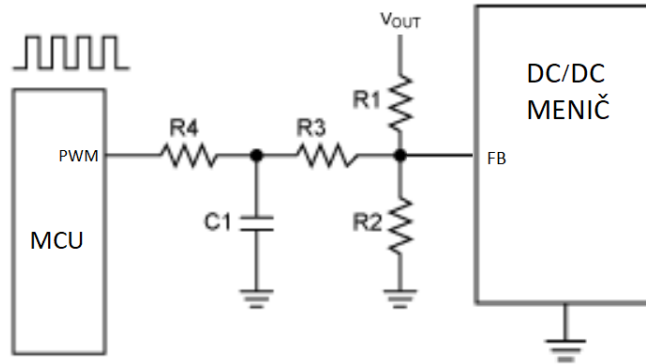
Obrázok 3.2 Zapojenie digitálneho potenciometru v obvode spätnej väzby, prekreslené z [5]

Výstupné napätie meniča je závislé na odpore digitálneho potenciometru [5]

$$U_{OUT} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2 + R_3}\right) . \quad (3.6)$$

3.3 PWM signál

PWM (pulse width modulation) signál generovaný mikrokontrolérom je prevedený cez filter typu dolná priepusť na jednosmerné napätie, ktorým je možné meniť prúdové pomery v obvode spätnej väzby. Hodnota tohto napätia a teda aj výstupného napätia meniča je závislá od striedy PWM signálu. Princíp zmeny prúdových pomerov je podobný spôsobu využívajúcejemu D/A prevodník. [5]



Obrázok 3.3 Zapojenie zdroja PWM signálu a filtra typu DP v obvode spätnej väzby, prekreslené z [5]

Úpravou rovnice 3.5, v ktorej je U_{DAC} nahradené napätím generovaným PWM signálom s filtrom typu dolná priepusť, ktoré je rovné [5]

$$U_{PWM} = D \cdot U_{OH} + (1 - D) \cdot U_{OL} , \quad (3.7)$$

a rezistor R_3 je nahradený súčtom odporov rezistorov R_3 a R_4 , vzniká rovnica pre výpočet výstupného napätia meniča riadeného PWM [5]

$$U_{OUT} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + (U_{REF} - D \cdot U_{OH} + (1 - D) \cdot U_{OL}) \cdot \frac{R_1}{R_3 + R_4} , \quad (3.8)$$

kde U_{OH} je maximálna hodnota napätia PWM signálu a U_{OL} je minimálna hodnota napätia PWM signálu.

Vo všeobecnosti tento spôsob nedosahuje takú presnosť ako dva vyššie spomenuté spôsoby, z dôvodu, že parametre signálu U_{OH} , U_{OL} a D majú určité tolerancie, ktoré sú z určitej miery závislé na teplote, prípadne napájacom napätí mikroprocesoru. [5]

4. VÝBER RIADIACEHO OBVODU MENIČA

Táto práca sa pre zjednodušenie venuje návrhu DC/DC meniča s výstupným výkonom 60 W, z dôvodu možných problémov, ktoré môžu vzniknúť pri odoberaní vysokých prúdov z batérie pri nízkom napájacom napätí popísaných v kapitole 5.6.1. Možný spôsob zvýšenia výstupného výkonu vrátane eliminácie problémov pri nízkom napájacom napätí je popísaný v kapitole 7.5.

Pred výberom riadiaceho obvodu je dôležité určiť parametre, na základe ktorých bude obvod zvolený. Samotné požiadavky napájacieho zdroja určujú niektoré parametre, medzi ktoré patrí vstupné napätie v rozsahu 6 až 48 V a výstupné napätie v rozsahu 15 až 30 V. Rovnako je zadaný minimálny výstupný výkon 60 W, z ktorého je možné odvodiť výstupný prúd. Pri konštantnom výkone bude z obvodu tiecť najväčší výstupný prúd práve pri najmenšom výstupnom napätí $U_{OUTmin} = 15$ V.

$$P_{OUT} = U_{OUTmin} \cdot I_{OUT} = 60 \text{ W} \rightarrow I_{OUT} = \frac{P_{OUT}}{U_{OUTmin}} = \frac{60}{15} = 4 \text{ A} . \quad (4.1)$$

Ďalším dôležitým parametrom je typ obvodu. Keďže vstupné napätie môže byť väčšie aj menšie ako výstupné napätie, je potrebné zvoliť riadiaci obvod pracujúci v topológii buck-boost. Pri požadovanom výkone treba zväziť použitie synchronného usmerňovača a usmerňovača využívajúceho diódy. Na diódach vznikajú dôsledkom väčšieho úbytku napätia väčšie výkonové straty ako na tranzistore, čím sa znižuje účinnosť obvodu [4]. Z toho dôvodu bol zvolený synchronný usmerňovač výstupného prúdu.

Vzhľadom na to, že navrhované zariadenie má byť prenosné, je potrebné dbať na čo najmenšiu veľkosť obvodu, ktorá je úmerná jeho zložitosti a počtu vývodov.

Požadované parametre riadiaceho obvodu sú nasledovné:

- Topológia buck-boost
- Synchronný usmerňovač výstupného prúdu
- Vstupné napätie v minimálnom rozsahu 6 až 48 V
- Výstupné napätie v minimálnom rozsahu 15 až 30 V
- Výstupný výkon najmenej 60 W
- Minimálny počet externých komponentov
- Puzdro s čo najmenším počtom vývodov

4.1 Porovnanie dostupných riadiacich obvodov

Pre výber obvodu boli využité katalógy súčiastok známych výrobcov ako sú Analog Devices a Texas Instruments. Elektronické katalógy umožňujú filtrovať súčiastky podľa požadovaných parametrov, čo zúžilo ponuku na niekoľko vyhovujúcich obvodov.

Filtrovaním obvodov podľa počtu vývodov 28 a menej vyhovovali požiadavkám nasledujúce obvody. Od firmy Texas Instruments to sú LM5176 a LM5118 a od firmy Analog Devices LT8390 a LT8392. Ďalej bolo nutné porovnať tieto obvody na základe informácií z katalógových listov.

Obvod LM5176 privádza na hradlo spínacích tranzistorov vstupné napätie, ktoré je v spracovávanej aplikácii v rozsahu 6 až 48 V [6]. To znamená, že tranzistor by musel byť plne otvorený už pri napätí 6 V a zároveň zvládnuť na hradle napätie vyššie ako 48 V. Bežne dostupné tranzistory zvládnu maximálne napätie na hradle približne 20 V. Naopak tranzistory, ktoré zvládnu väčšie napätie sa nedokážu naplno otvoriť už pri napätí

6 V. Výber tranzistorov by bol vzhľadom na vyššie stanovené požiadavky veľmi komplikovaný, preto bol tento obvod z výberu vylúčený.

Obvod LM5118, nie je menič so synchronným usmerňovačom, to znamená že namiesto časti spínacích tranzistorov používa diódy [7]. Vzhľadom na to, že pri použití usmerňovacích diód by vznikli väčšie výkonové straty, čo by negatívne ovplyvnilo účinnosť, bol aj tento obvod z výberu vylúčený [4].

Zvyšné dva obvody LT8390 a LT8392 sú, čo sa týka parametrov, veľmi podobné. Pracujú v rovnakom rozsahu frekvencií, a to od 150 do 650 kHz. Obvod LT8392 disponuje vývodom EXTVCC, ktorý poskytuje možnosťou pripojenia externého napätia napájajúceho budič tranzistorov v prípade, že použité tranzistory vyžadujú napätie $U_{GS(\min RDSon)}$ väčšie než napätie generované integrovaným LDO regulátorom na úrovni 5 V. Obvod LT8390 má tento vývod nahradený vývodom LOADTG, ktorým je možné po dosiahnutí požadovaného výstupného napätia spínať tranzistor na výstupe meniča, a tým pripájať alebo odpájať záťaž. Výhodnejšie by bolo zvoliť obvod LT8390 pre funkciu LOADTG, ktorá má väčší potenciál využitia v tejto aplikácii. Pri využití externého napájania tranzistorov v obvode LT8392 by bolo potrebné toto napájanie určitým obvodom generovať, čo by skomplikovalo návrh zariadenia. Vhodnejšie je využiť integrovaný LDO regulátor a zvoliť tranzistory pracujúce s napätím $U_{GS(\min RDSon)} \leq 5$ V. Ďalším rozdielom je väčšie dovolené prúdové zaťaženie tohto regulátora v obvode LT8392 oproti obvodu LT8390, v ktorom bol maximálny prúd zväčšený zo 110 na 190 mA. Ako je uvedené v katalógovom liste, väčšie prúdové zaťaženie umožňuje vybrať spínacie tranzistory s väčším celkovým nábojom hradla, preto sa ako vhodnejší obvod javí LT8392. Samotný výrobca odporúča uprednostniť tento obvod v nových návrhoch, avšak v čase spracovávania tejto práce nebol obvod LT8392 dostupný u žiadnych známych distribútorov súčiastok. Bol preto zvolený obvod LT8390, ktorý vyhovuje všetkým požadovaným parametrom. [8] [9]

5. NÁVRH S LT8390

Ako návrhové prostredie bol využitý voľne dostupný program KiCAD. Tento obsahuje schematický editor a editor DPS s možnosťou exportu GERBER súborov potrebných pre výrobu navrhutej DPS.

Táto kapitola sa venuje výberu vhodných externých súčiastok a výpočtu ich hodnôt na základe požadovaných parametrov. Schéma navrhnutého meniča je zobrazená v prílohe B.

5.1 Určenie pracovných parametrov

Jedným z najdôležitejších parametrov pri návrhu je spínacia frekvencia. Platí, že pri vyššej spínacej frekvencii vznikajú väčšie straty pri nabíjaní a vybíjaní kapacity hradla tranzistorov a straty spôsobené ochrannou dobou [2] [10]. Zároveň však pri vyššej frekvencii postačujú menšie rozmery cievky a výstupných kondenzátorov [2] [10]. Pri nižšej frekvencii platí opačný stav, preto treba zvoliť kompromis. V tejto aplikácii sa javí vhodnejšia voľba väčšej frekvencie, aby boli zachované čo najmenšie rozmery zariadenia, napriek väčším výkonovým stratám, ktoré by pri výstupnom výkone 60 W nemali dosahovať príliš veľkých hodnôt.

Obvod LT8390 ponúka možnosť zvoliť frekvenciu až do 650 kHz, výrobca zároveň v katalógovom liste uvádza konkrétne hodnoty rezistorov R_T pre konkrétne pracovné frekvencie. Bola zvolená frekvencia na hornej hranici rozsahu, a to 600 kHz, pre ktorú je potrebné použiť rezistor $R_T = 59 \text{ k}\Omega$. [8]

Maximálny spínaný prúd je dôležitý pri výbere viacerých komponentov a je potrebné ho určiť vopred. Výpočet tohto prúdu sa líši v závislosti na režime obvodu a na veľkosti vstupného a výstupného napätia. Pre zjednodušenie je uvedený výpočet len pre režim boost so vstupným napätím 6 V a výstupným napätím 30 V, v ktorom tento prúd dosahuje maximálnu hodnotu. Pri predpoklade, že účinnosť meniča bude aspoň 80 % je možné určiť maximálny spínaný prúd nasledujúcimi rovnicami [11]

$$D = 1 - \frac{U_{IN} \cdot \eta}{U_{OUT}} = 1 - \frac{6 \cdot 0,8}{15} = 0,84, \quad (5.1)$$

z hodnoty striedy signálu je možné vypočítať zvlnenie prúdu cievkou, s využitím hodnoty indukčnosti vypočítanej v kapitole 5.3

$$\Delta I_L = \frac{U_{IN} \cdot D}{f \cdot L} = \frac{6 \cdot 0,84}{6 \cdot 10^5 \cdot 47 \cdot 10^{-6}} = 0,179 \text{ A}, \quad (5.2)$$

následne je možné vypočítať veľkosť spínaného prúdu

$$I_{SW} = \frac{\Delta I_L}{2} + \frac{I_{OUT}}{1-D} = \frac{0,179}{2} + \frac{2}{1-0,84} = 12,59 \text{ A}. \quad (5.3)$$

Veľkosť prúdu I_{OUT} s hodnotou 2 A vyplýva zo zachovania výstupného výkonu 60 W pri výstupnom napätí 30 V.

Zvyšné súčiastky musia byť dimenzované aspoň na túto hodnotu prúdu.

5.2 Výber spínacích tranzistorov

Riadiaci obvod vyžaduje 4 výkonové tranzistory typu MOSFET s indukovaným N kanálom. Keďže budú spínať napätie do výšky vstupného napätia, bude pri výbere dôležité priraziť napätie $U_{BR(DSS)}$ medzi D a S vývodmi. $U_{BR(DSS)}$ je nutné zvoliť väčšie ako 48 V. Ďalším parametrom je veľkosť náboja hradla, na ktorom závisí veľkosť strát P_{GATE} podľa rovnice

$$P_{GATE} = Q_g \cdot U_{DRIVER} \cdot f_{SW} , \quad (5.4)$$

kde Q_g je celkový náboj hradla, U_{DRIVER} je napätie budiča tranzistorov (5 V v obvode LT8390) a f_{SW} je spínacia frekvencia [12]. Keďže v každom režime spínajú dva tranzistory, sú celkové straty spôsobené nabíjaním a vybíjaním hradla rovné dvojnásobku P_{GATE} .

Odpor kanála tranzistoru v zopnutom stave R_{DSon} je vhodné zvoliť čo najmenší, pretože na ňom závisí celková účinnosť obvodu a aj výkonové zaťaženie tranzistorov. Požadované parametre spínacích tranzistorov sú zhrnuté v tabuľke 5.1.

Tabuľka 5.1 Požadované parametre spínacích tranzistorov

$U_{GS(minRDSon)}$	$U_{BR(DSS)}$	Q_g	R_{DSon}	I_D
$\leq 5 \text{ V}$	$> 48 \text{ V}$	Najmenší možný	Najmenší možný	$> 12,59 \text{ A}$

Týmto požiadavkám najviac vyhovoval cenovo dostupný tranzistor BSC070N10LS5 s parametrami $U_{BR(DSS)} = 100 \text{ V}$, $U_{GS(minRDSon)} = 4,5 \text{ V}$, $R_{DSon} = 7 \text{ m}\Omega$, $Q_g = 30 \text{ nC}$ a $I_D = 79 \text{ A}$ [13].

5.3 Výber cievky

Dôležité parametre cievky sú indukčnosť, odpor vinutia, pracovný a saturačný prúd. Výrobca obvodu určuje pre rôzne pracovné režimy meniča rôzne vzorce pre výpočet potrebnej indukčnosti. Indukčnosť je nutné zvoliť väčšiu ako je najväčšia vypočítaná hodnota. Minimálna indukčnosť potrebná v režime buck je daná rovnicou [8]

$$L_{BUCK} > \frac{U_{OUT} \cdot (U_{INmax} - U_{OUT})}{f \cdot I_{OUTmax} \cdot \Delta I_L \% \cdot U_{INmax}} = \frac{30 \cdot (48 - 30)}{6 \cdot 10^5 \cdot 2,0,3 \cdot 48} = 31,25 \mu\text{H} , \quad (5.5)$$

kde U_{OUT} je výstupné napätie (je zvolené maximálne výstupné napätie, teda 30 V) a I_{OUTmax} je zodpovedajúci výstupný prúd $I_{OUTmax} = 2 \text{ A}$, $\Delta I_L \%$ je zvlnenie prúdu cievkou, bežná hodnota sa volí medzi 20 až 40 %, bolo zvolených 30 % [14]. Podobne je možné vypočítať minimálnu potrebnú indukčnosť pre boost režim [8]

$$L_{BOOST} > \frac{U_{INmax}^2 \cdot (U_{OUT} - U_{INmax})}{f \cdot I_{OUTmax} \cdot \Delta I_L \% \cdot U_{OUT}^2} = \frac{6^2 \cdot (30 - 6)}{6 \cdot 10^5 \cdot 2,0,3 \cdot 30^2} = 2,67 \mu\text{H} . \quad (5.6)$$

Z výsledkov vyplýva, že minimálna potrebná indukčnosť pre navrhovaný menič musí byť väčšia ako 31,25 μH .

Cievka musí byť dimenzovaná na prúd minimálne 12,59 A, ktorý bol vypočítaný v kapitole 5.1. Saturačný prúd je prúd, pri ktorom indukčnosť klesne o 30 % a je vhodné aby bol čo najväčší a odpor vinutia cievky DCR čo najmenší [15].

Bol zvolený produkt 74437529203470 od výrobcu Würth Elektronik s nasledujúcimi parametrami. Menovitá indukčnosť $L = 47 \mu\text{H}$, pracovný prúd $I_P = 18,7 \text{ A}$, saturačný prúd $I_{SAT} = 13 \text{ A}$ a odpor vinutia $\text{DCR} = 8,8 \text{ m}\Omega$ [15].

5.4 Výber vstupných a výstupných kondenzátorov

Výstupné kondenzátory slúžia na vyhladenie zvlnenia výstupného napätia, ktoré je dôsledkom dvoch javov. Prvý jav je nabíjanie a vybíjanie kapacity počas spínacieho cyklu a druhý jav je vplyv úbytku napätia spôsobeného tokom prúdu ekvivalentným sériovým odporom kondenzátorov [8]. Z toho vyplýva, že najdôležitejšími parametrami pri výbere kondenzátorov budú práve veľkosť kapacity a ekvivalentného sériového odporu. Pri určení požadovaných hodnôt je potrebné najprv určiť maximálnu veľkosť zvlnenia výstupného napätia spôsobeného jednotlivými javmi. Maximálna prípustná hodnota bola zvolená na úrovni 50 mV pre zvlnenie ΔU_{CAP} spôsobené nabíjaním a vybíjaním kapacity a rovnako 50 mV pre zvlnenie ΔU_{ESR} spôsobené úbytkom napätia na odpore ESR. To znamená že maximálna prípustná hodnota zvlnenia je 100 mV . Dosadením do rovníc uvedených v katalógovom liste je možné vypočítať potrebnú hodnotu kapacity a maximálnu hodnotu ESR pre buck a boost režim. Potrebná hodnota kapacity je väčšia ako najväčšia z vypočítaných hodnôt a naopak prípustná hodnota odporu ESR je menšia ako najmenšia vypočítaná hodnota.

Hodnota minimálnej kapacity pre boost režim je určená nasledovne [8]

$$C_{OUT(BOOST)} = \frac{I_{OUTmax} \cdot (U_{OUT} - U_{INmax})}{\Delta U_{CAP} \cdot U_{OUT} \cdot f} = \frac{4 \cdot (15 - 6)}{0,05 \cdot 15 \cdot 6 \cdot 10^5} = 80 \mu\text{F} \quad (5.7)$$

a pre buck režim nasledovne [8]

$$C_{OUT(BUCK)} = \frac{U_{OUT} \cdot (1 - \frac{U_{OUT}}{U_{INmax}})}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot \Delta U_{CAP}} = \frac{30 \cdot (1 - \frac{30}{48})}{8 \cdot 47 \cdot 10^{-6} \cdot (6 \cdot 10^5)^2 \cdot 0,05} \doteq 1,66 \mu\text{F} . \quad (5.8)$$

Pre dosiahnutie požadovaného zvlnenia napätia je potrebná výstupná kapacita väčšia ako $80 \mu\text{F}$. Rovnako zo vzorcov pre výpočet zvlnenia na odpore ESR je možné určiť maximálnu hodnotu ESR pre boost režim [8]

$$ESR_{BOOST} = \frac{\Delta U_{ESR} \cdot U_{IN(MIN)}}{U_{OUT} \cdot I_{OUT(MAX)}} = \frac{0,05 \cdot 6}{30 \cdot 2} = 5 \text{ m}\Omega \quad (5.9)$$

a pre buck režim [8]

$$ESR_{BUCK} = \frac{\Delta U_{ESR} \cdot L \cdot f}{U_{OUT} \cdot (1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN(MAX)}})} = \frac{0,05 \cdot 47 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^5}{30 \cdot (1 - \frac{30}{48})} \doteq 125 \text{ m}\Omega . \quad (5.10)$$

Celkový ESR výstupných kondenzátorov by nemal presiahnuť $5 \text{ m}\Omega$. Výhodnejšie ako použitie jedného kondenzátora s určitým ESR sa javí použitie viacerých kondenzátorov zapojených paralelne, čím sa dosiahne menší ESR a zároveň väčšia kapacita. Ďalšou možnosťou zmenšenia zvlnenia je použitie konkrétnych typov kondenzátorov, ako sú keramické alebo tantalové kondenzátory, zapojené paralelne k elektrolytickým, ktoré síce nemajú veľkú kapacitu, ale majú lepšie frekvenčné charakteristiky [8]. Bolo zvolené zapojenie troch elektrolytických a dvoch keramických kondenzátorov zapojených paralelne. Boli použité elektrolytické kondenzátory EEH-ZS1J151P s kapacitou $C = 150 \mu\text{F}$, $\text{ESR} = 15 \text{ m}\Omega$ a maximálnym napätím $U = 63$

V a keramické kondenzátory HMK325C7475KM-PE s kapacitou $C = 4,7 \mu\text{F}$ a napätím $U = 100 \text{ V}$. Odpor ESR keramických kondenzátorov nie je v katalógovom liste uvedený, ale jeho veľkosť je možné predpokladať v rádoch jednotkách až desiatkach $\text{m}\Omega$.

Zapojenie vstupných kondenzátorov bolo zvolené rovnaké ako zapojenie výstupných kondenzátorov. Výsledný ESR je daný paralelným zapojením náhradných rezistorov s rovnakým odporom. ESR elektrolytických kondenzátorov je rovný

$$ESR = (3 \cdot ESR_E^{-1})^{-1} = (3 \cdot 0,015^{-1})^{-1} \doteq 5 \text{ m}\Omega \quad (5.11)$$

Po pripojení keramických kondenzátorov paralelne k elektrolytickým sa odpor ESR zníži pod hodnotu $5 \text{ m}\Omega$.

5.5 Výber ostatných súčiastok obvodu

Obvod LT8390 používa pre obmedzenie vstupného a výstupného prúdu rezistory snímajúce prúd. Napätie vzniknuté na rezistoroch úmerné veľkosti prechádzajúceho prúdu je porovnávané s vnútornou referenciou obvodu. Ak jedno z napätí prekročí prahovú hodnotu, obvod zníži striedu spínania, prípadne prestane spínať úplne. Hodnota vstupnej referencie je $U_{LS} = 50 \text{ mV}$ a výstupnej referencie je $U_{IS} = 100 \text{ mV}$. [8]

Využitím Ohmovho zákona je možné stanoviť veľkosti odporu snímacích rezistorov nasledovne

$$R_{SENSE(IN)} = \frac{U_{LS}}{I_{INmax}} = \frac{0,05}{12,5} = 4 \text{ m}\Omega . \quad (5.12)$$

$$R_{SENSE(OUT)} = \frac{U_{IS}}{I_{OUTmax}} = \frac{0,1}{5} = 20 \text{ m}\Omega . \quad (5.13)$$

Veľkosť kondenzátoru C_{19} určuje oneskorenie, počas ktorého výstupné napätie rastie až na požadovanú hodnotu. Táto funkcia sa nazýva soft start a využíva sa na plynulý nábeh zdroja, ktorý má za následok menšie namáhanie súčiastok. [8]

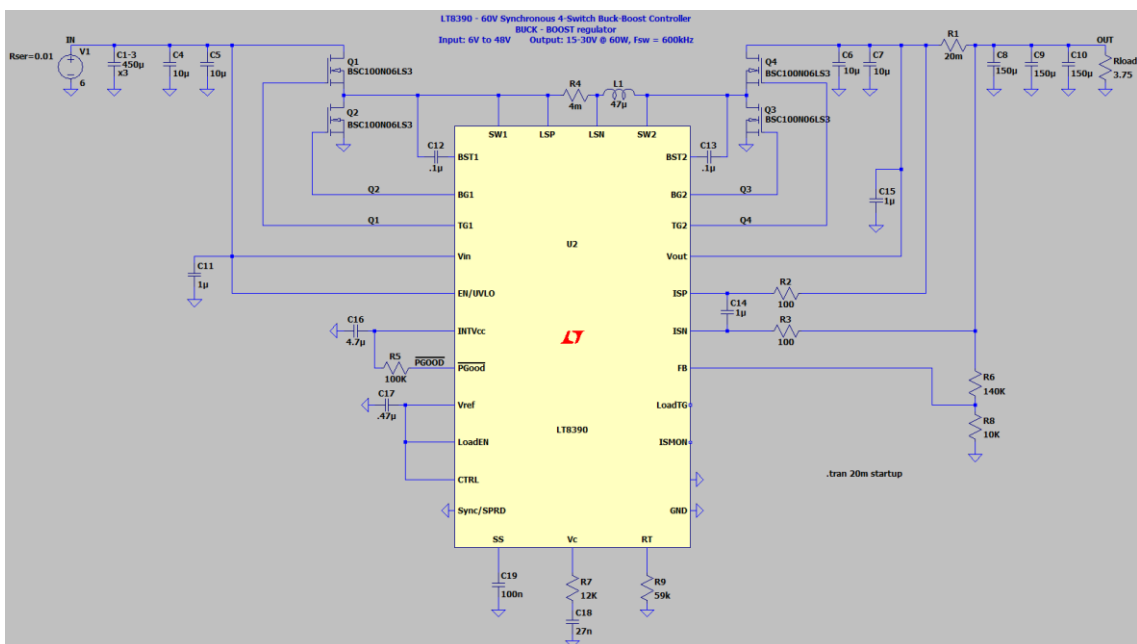
Bola zvolená hodnota kapacity $C_{19} = 100 \text{ nF}$, ktorá zabezpečí oneskorenie 8 ms .

Hodnoty ostatných externých súčiastok boli zvolené na základe odporúčaní výrobcu uvedených v katalógovom liste obvodu LT8390. Tieto hodnoty sú uvedené v schéme v prílohe 1.

5.6 Simulácia obvodu

Ako simulačný program bol využitý program LTSpice XVII z dôvodu dostupnosti modelu riadiaceho obvodu LT8390 priamo od výrobcu práve pre tento program. Rovnako bola využitá možnosť programu zadať parazitné vlastnosti použitých súčiastok akými sú ESR kondenzátorov a DCR cievky. Nebolo možné nájsť model tranzistorov, ktorý je použitý v návrhu, preto bol použitý dostupný model BSC100N06LS3 s podobnými parametrami. Pre porovnanie má tento model vyšší odpor $R_{DSon} = 10 \text{ m}\Omega$ a nižší celkový náboj hradla $Q_g = 15 \text{ nC}$ oproti tranzistoru BSC070N10LS5 s $R_{DSon} = 7 \text{ m}\Omega$ a $Q_g = 30 \text{ nC}$ [13] [16].

Simulácia je zameraná predovšetkým časové priebehy sledovaných napätí a prúdov, z toho dôvodu bola použitá časová analýza (transient) s vhodným časovým limitom. Zapojenie obvodu v programe LTSpice je možné vidieť na obrázku 5.1.



Obrázok 5.1 Schéma obvodu DC/DC meniča v programe LTSpice

Sú simulované celkovo štyri kritické funkčné stavy, a to funkcia pri maximálnom a minimálnom vstupnom napätí v kombinácii s maximálnym a minimálnym výstupným napätím, pri konštantnom výstupnom výkone 60 W. V každom funkčnom stave je sledovaná účinnosť obvodu, čas, za ktorý sa obvod dostane do stabilizovaného stavu a zvlnenie výstupného napätia. Sú sledované časové priebehy signálov spínajúcich tranzistory, prúdu cievkou a ďalších veličín. Kvôli prehľadnosti sú zobrazené len časové priebehy režimu boost pri zmene napätia zo 6 na 30 V a režimu buck pri zmene napätia zo 48 na 30 V. Dosiagnuté hodnoty sledovaných veličín zvyšných dvoch stavov sú zobrazené v tabuľke 5.2.

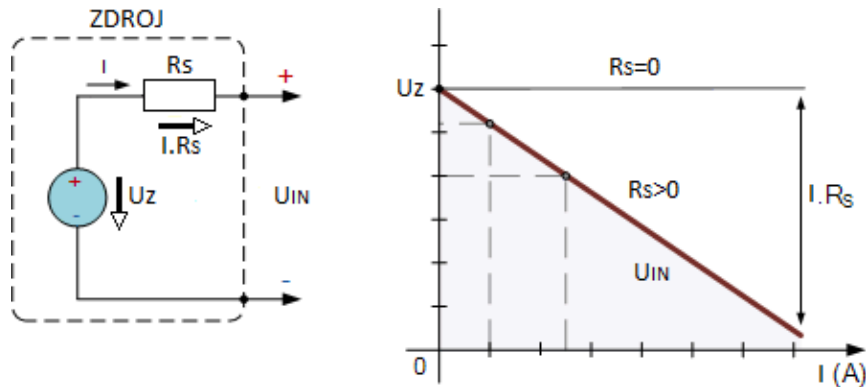
5.6.1 Vplyv vnútorného sériového odporu zdroja na funkciu meniča

Každý zdroj napätia má svoj vnútorný sériový odpor, ktorého veľkosť definuje kvalitu tohto zdroja. Reálny zdroj napätia a jeho zaťažovacia charakteristika je zobrazená na obrázku 5.2. Pri pripojení záťaže tečie zo zdroja prúd I , ktorý vyvolá úbytok napätia na

vnútornom odpore R_S . Výstupné napätie zdroja, teda vstupné napätie meniča U_{IN} je rovné rozdielu elektromotorického napätia zdroja U_Z a úbytku napätia na odpore R_S . [17]

$$U_{IN} = U_Z - I \cdot R_S . \quad (5.14)$$

Z toho vyplýva, že čím je odoberaný prúd väčší, tým je na svorkách zdroja menšie napätie, tak ako ukazuje zaťažovacia charakteristika U_{IN} na obrázku 5.2.



Obrázok 5.2 Charakteristika reálneho zdroja napätia, prekreslené z [17]

Pri simulácii navrhnutého meniča sa vnútorný odpor zdroja prejavil na výsledkoch dvoma spôsobmi. V prípade, keď bol použitý ideálny zdroj napätia s nulovým vnútorným odporom, sa prúdové špičky spôsobené spínaním tranzistorov vykryli zo zdroja a nie zo vstupných kondenzátorov, ktoré sú na to určené. V tomto prípade fungoval zdroj ako skrat pre striedavý signál. To vo výsledku spôsobilo zníženie efektivity meniča, v niektorých prípadoch až pod 50 %. Táto situácia pretrvávala až do stavu, kým vnútorný odpor zdroja R_S nebol väčší ako odpor ESR vstupných kondenzátorov. Až následne sa prúdové špičky vykryvali zo vstupných kondenzátorov a napätový zdroj bol menej zaťažovaný.

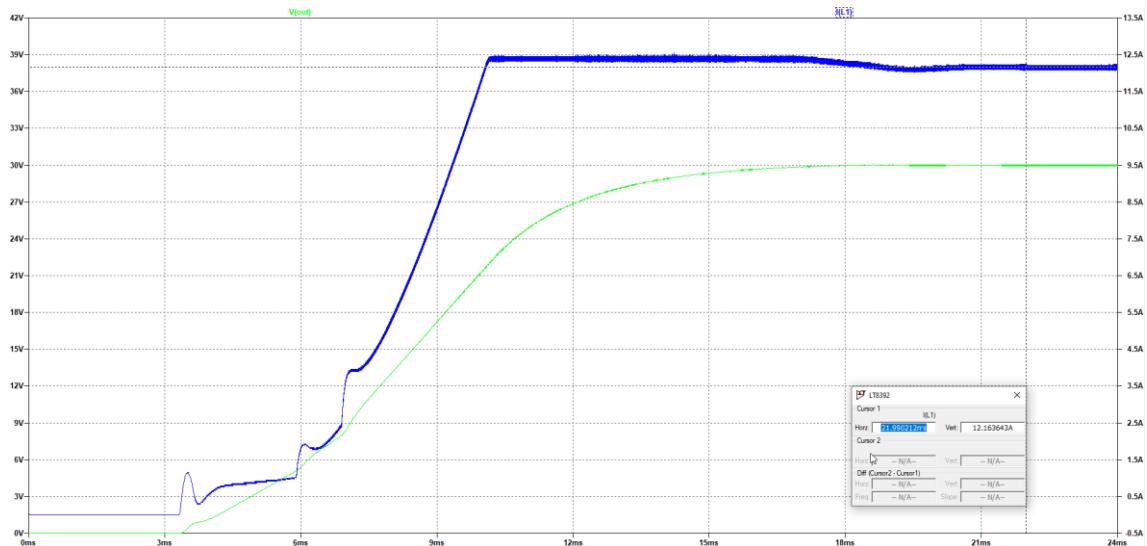
Naopak, pri príliš veľkom vnútornom odpore zdroja na ňom vzniká taký veľký úbytok napätia, že výstupné napätie zdroja už nie je dostačujúce pre funkciu meniča. Tento problém sa prejavil hlavne pri simulácii v režime boost so vstupným napätím 6 V a vnútorným odporom zdroja väčším ako 100 m Ω , kde hodnota vstupného napätia meniča pri odoberanom prúde väčšom ako 10 A nedosahovala ani 5 V.

Táto práca je zameraná na simuláciu funkcie samotného meniča pri uvedených parametroch, preto bolo potrebné minimalizovať vplyv vnútorného odporu zdroja. Bola zvolená vhodná veľkosť vnútorného odporu tak, aby sa neprejavil ani jeden nežiaduci jav. Veľkosť odporu ESR vstupných kondenzátorov stanovená v kapitole 5.4, je menšia ako 5 m Ω , preto bol vnútorný odpor zdroja nastavený na hodnotu 10 m Ω . Tento odpor je dostatočne malý, aby na ňom aj pri veľkých odoberaných prúdoch nevznikli veľké úbytky napätia a zároveň je väčší ako ESR vstupných kondenzátorov.

V praxi veľkosť tohto odporu nie je zanedbateľná a preto je jeho vplyv na funkciu meniča nutné spomenúť. Batériové zdroje v automobilových rozvodoch majú veľkosť vnútorného odporu v rádo desiatkach až stovkách m Ω [18]. Zároveň sa k vnútornému odporu batérie pričíta odpor prívodu k zariadeniu. Pri napätových rozvodoch s nominálnym napätím 6 V môže celkový odpor a prúd, ktorý ním prechádza vyvolať taký veľký úbytok napätia, že napätie na vstupe meniča klesne pod kritickú hodnotu a menič nebude fungovať. Možné riešenie tohto problému je popísané v kapitole 7.5.

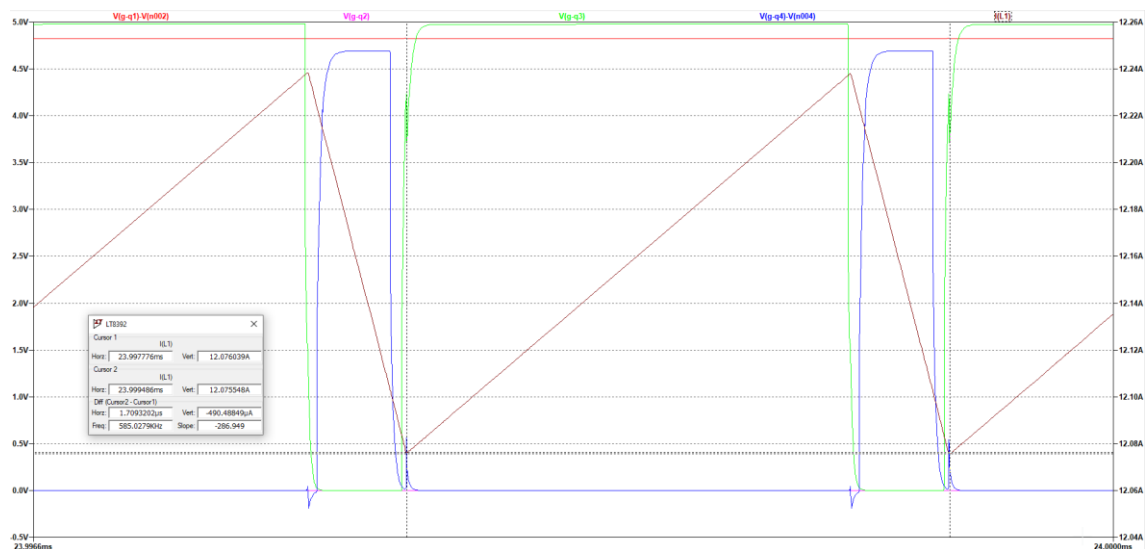
5.6.2 Simulácia režimu boost pri zmene napätia zo 6 na 30 V

Na obrázku 5.3 je možné vidieť nárast výstupného napätia a priebeh prúdu cievkou pri zapnutí meniča. Výstupné napätie dosiahlo stabilnú hodnotu 30 V v čase približne 22 ms od spustenia simulácie. Je zrejmé, že spínaný prúd dosiahol maximálnu povolenú hodnotu 12,5 A stanovenú v kapitole 5.5.



Obrázok 5.3 Časový priebeh výstupného napätia a prúdu cievkou v boost režime s výstupným napätím 30 V

Obrázok 5.4 ukazuje časové priebehy prúdu cievkou a signálov na hradlách tranzistorov, z ktorých je možné odvodiť funkciu v režime boost nasledovne: Spínajú tranzistory Q_3 a Q_4 , tranzistor Q_1 je počas celej periódy otvorený a tranzistor Q_2 zatvorený. Tranzistor Q_3 je otvorený po dobu $t_{ON} = 1,396 \mu s$ a zatvorený po dobu $t_{OFF} = 0,31 \mu s$, strieda spínania dosahuje v tomto stave podľa rovnice 2.4 hodnotu 81,8 %.

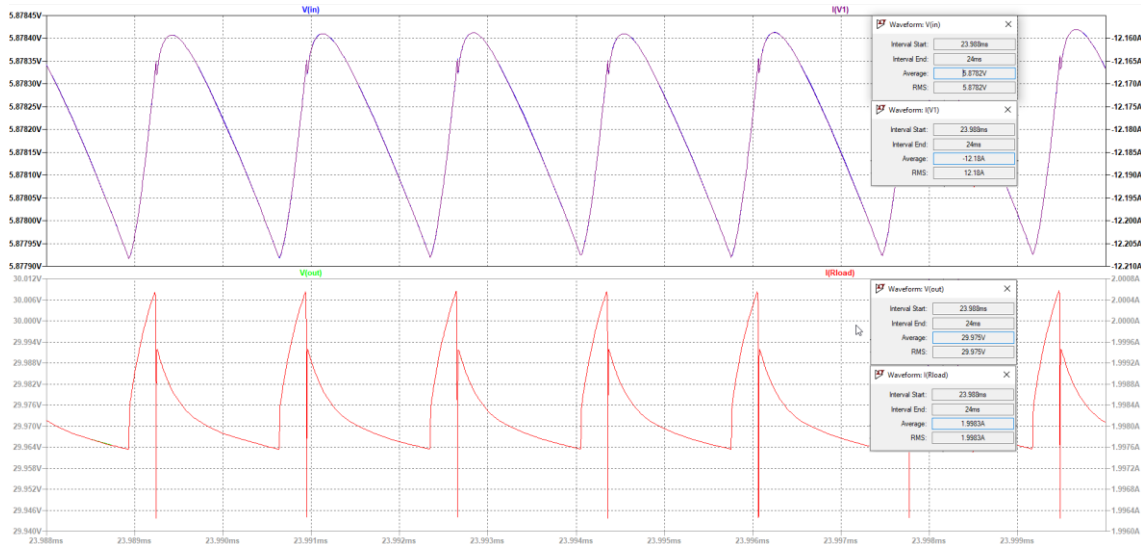


Obrázok 5.4 Časové priebehy spínacích signálov a prúdu cievkou pre boost režim s výstupným napätím 30 V

Program LTspice umožňuje vypočítať efektívnu hodnotu veličiny sledovaného signálu z určitého počtu periód. Z efektívnych hodnôt vstupných a výstupných napätí a prúdov z obrázku 5.5 je možné stanoviť účinnosť obvodu v tomto stave. Účinnosť dosahuje hodnotu 83,65 %.

$$\eta [\%] = \frac{U_{OUT} \cdot I_{OUT}}{U_{IN} \cdot I_{IN}} \cdot 100\% = \frac{29,975 \cdot 1,998}{5,878 \cdot 12,18} \cdot 100\% = 83,65 \% . \quad (5.15)$$

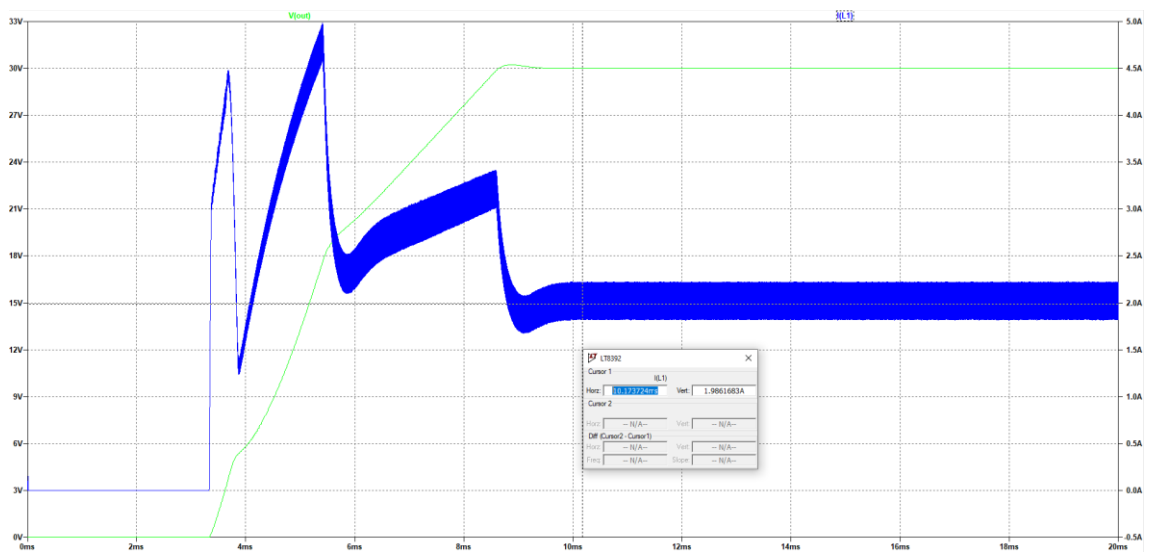
Nakoniec bolo pomocou kurzorov stanovené zvlnenie výstupného napätia, ktoré dosahuje $\Delta U_{OUT} = 64 \text{ mV}_{p-p}$.



Obrázok 5.5 Časové priebehy vstupného a výstupného napätia a prúdu v boost režime s výstupným napätím 30 V

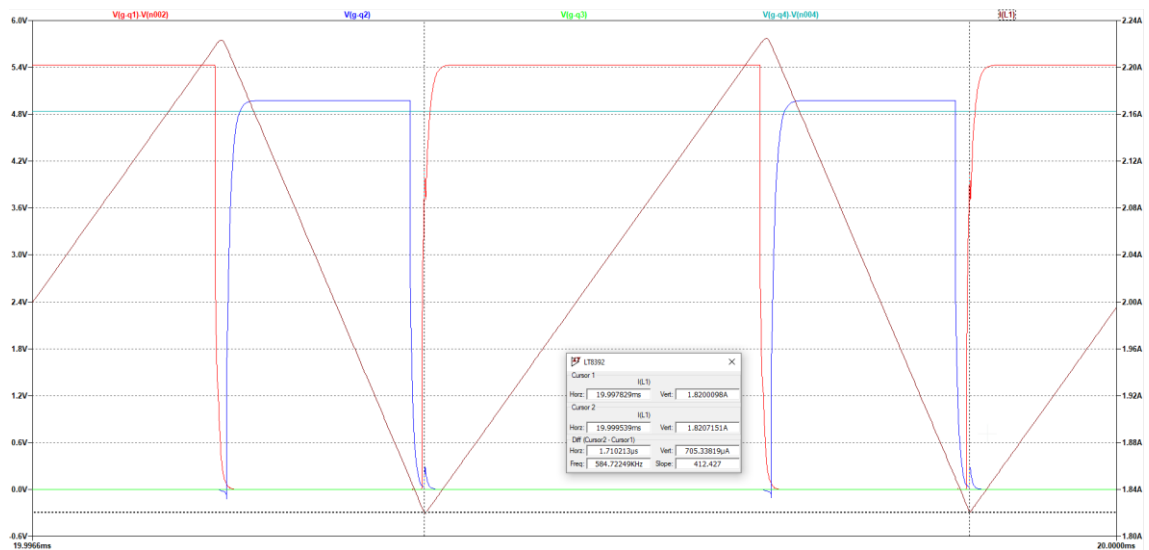
5.6.3 Simulácia režimu buck pri zmene napätia zo 48 na 30 V

Na obrázku 5.6 je zobrazený časový priebeh výstupného napätia a prúdu cievkou. Pokles spínaného prúdu v čase približne 4 ms a 5,5 ms je spôsobený funkciou soft start. Obvod LT8390 obmedzí spínaný prúd, čím sa zníži rýchlosť nárastu výstupného napätia. Pokles prúdu v čase približne 8,5 ms je spôsobený prirodzeným dejom v momente keď sa výstupné napätie dostalo do stabilizovaného stavu. Čas ustálenia výstupného napätia je približne 10,2 ms od zapnutia obvodu.



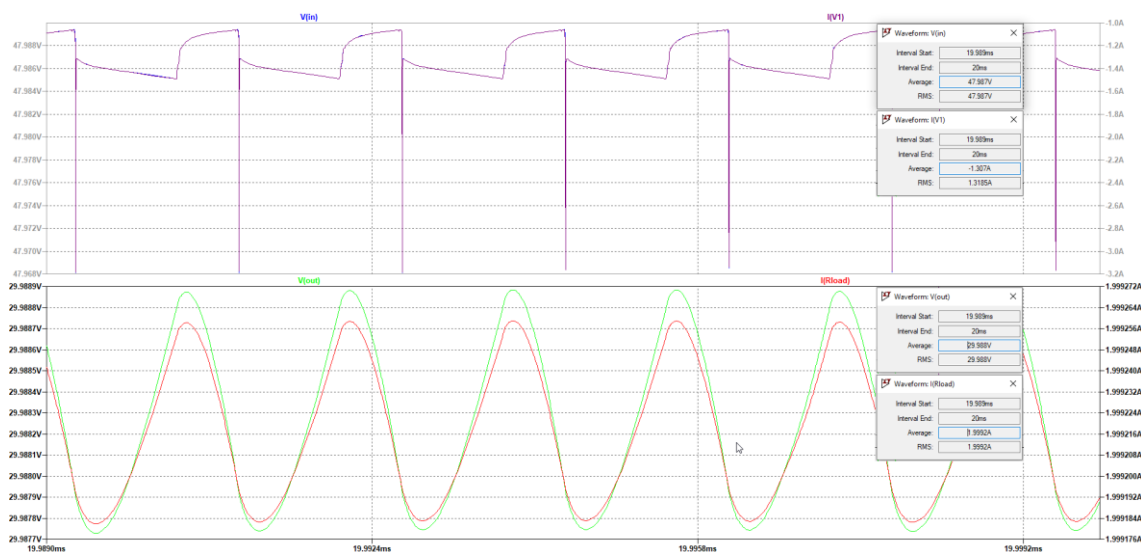
Obrázok 5.6 Časový priebeh výst. napätia a prúdu cievkou pre buck režim s výstupným napätím 30 V

Z obrázku 5.7 je zjavné, že tentokrát obvod pracuje v buck režime. Spínajú tranzistory Q_1 a Q_2 , zatiaľ čo tranzistor Q_3 je počas celej periódy zatvorený a tranzistor Q_4 otvorený. Strieda signálu v tomto stave dosahuje podľa rovnice 2.3 62,6 %.



Obrázok 5.7 Časové priebehy spínacích signálov a prúdu cievkou v buck režime s výstupným napätím 30 V

Dosadením efektívnych hodnôt vstupných a výstupných veličín z obrázku 5.8 do rovnice 2.1 je možné vypočítať účinnosť obvodu, ktorá činí $\eta = 94,79\%$. Zvlnenie výstupného napätia je $\Delta U_{OUT} = 1,14 \text{ mV}_{p-p}$.



Obrázok 5.8 Časové priebehy vstupného a výstupného prúdu a napätia v buck režime s výstupným napätím 30 V

5.6.4 Porovnanie výsledkov

V tabuľke 5.2 sú zhrnuté výsledky simulácie vo všetkých štyroch stavoch. V každom režime bol sledovaný čas ustálenia t_s , efektívnosť obvodu η , strieda spínania D a zvlnenie výstupného napätia ΔU_{OUT} .

Tabuľka 5.2 Porovnanie sledovaných parametrov v simulácii

	t_s [ms]	D [%]	η [%]	ΔU_{OUT} [mV _{p-p}]
6 \Rightarrow 15	11,4	64	87,88	59
6 \Rightarrow 30	22	81,8	83,65	64
48 \Rightarrow 15	9,1	31,9	90,94	1,05
48 \Rightarrow 30	10,2	62,61	94,79	1,14

Je možné konštatovať, že najlepšie výsledky dosahuje obvod v režime buck, a to z pohľadu všetkých sledovaných hodnôt. Väčšia efektívnosť obvodu v buck režime je spôsobená menšími výkonovými stratami, spôsobenými menším vstupným prúdom. Najväčší stratový výkon dosahuje obvod v režime boost pri zmene napätia zo 6 na 30 V. V tomto prípade pracuje obvod s efektívnosťou 83,65 %. Pri tejto účinnosti a výstupnom výkone 60 W dosahuje stratový výkon podľa rovnice 2.1 hodnotu

$$P_D = P_{OUT} \cdot \left(\frac{100}{\eta} - 1 \right) = 60 \cdot \left(\frac{100}{83,65} - 1 \right) \doteq 11,73 \text{ W} . \quad (5.16)$$

Najväčšiu efektívnosť $\eta = 94,79$ % dosahuje obvod v režime buck pri zmene napätia zo 48 na 30 V a stratový výkon v tomto stave činí približne 3,3 W.

6. NÁVRH VSTUPNEJ OCHRANY

Z hľadiska spôsobu použitia navrhovaného meniča je vhodné menič vybaviť tromi typmi ochrán, a to ochranou proti prepätiu, ochranou proti opačnej polarite vstupného napätia a nadprúdovou ochranou. Ako najvhodnejšie riešenie nedeštruktívnej ochrany sa javí použitie integrovaného obvodu, ktorý je pre takúto funkciu určený.

Prahové hodnoty napätí a prúdu sú zvolené s určitou rezervou tak, aby ochrana nebola aktívna v bežnom pracovnom stave, a zároveň tak, aby bola aktivovaná skôr, ako budú prekročené maximálne prípustné hodnoty napätí chránených súčiastok.

Hodnota vstupného napätia, po ktorej prekročení bude aktivovaný ochranný obvod bola stanovená na 56 V. Toto napätie je s dostatočnou rezervou vyššie od maximálneho pracovného napätia meniča s hodnotou 48 V, aby vykrylo prípadné zvlnenie a zároveň je menšie než maximálne napätie 60 V, ktoré je možné pripojiť na obvod LT8390 [8]. Prahová hodnota vstupného prúdu bola stanovená na 15 A, ktorá je približne o 2 A väčšia než maximálna hodnota vstupného prúdu vypočítaná v kapitole 5.1.

6.1 Návrh s LTC4380-4

Bol zvolený integrovaný obvod LTC4380-4 od firmy Analog Devices. Tento integrovaný obvod z kategórie „surge stopper“ dokáže pracovať v rozsahu napätí 4 až 72 V, funguje ako prepäťová a nadprúdová ochrana s nastaviteľnou prahovou hodnotou a ako ochrana proti reverznému napätiu do veľkosti -60 V. Ochrana proti reverznému napätiu je tvorená zapojením dvoch tranzistorov typu MOSFET v zapojení back-to-back. Toto zapojenie eliminuje problém telovej diódy tranzistoru MOSFET, ktorá by pri použití jedného tranzistoru a pri opačnej polarite napätia medzi D a S mohla viesť prúd. [19]

Pri výpočte hodnôt jednotlivých externých súčiastok bol využitý katalógový list obvodu LTC4380 [19]. Značenie súčiastok je zhodné so značením na obrázku 6.1 a v prílohe B.

Rezistor R_{22} a kondenzátor C_{21} zabezpečujú dostatočný napájací prúd a stabilné napájacie napätie pre integrovaný obvod počas prípadného poklesu vstupného napätia pod úroveň 4 V, trvajúceho určitú dobu. Vstupný prúd obvodu LTC4380 je rovný $I_{VCC} = 40 \mu A$ a doba poklesu počas takzvaného studeného štartu automobilu môže trvať až 40 ms [19]. Maximálny odpor rezistoru R_{22} je [19]

$$R_{22} = \frac{U_{INmin} - U_{CCmin}}{I_{VCC}} = \frac{5 - 4}{40 \cdot 10^{-6}} = 25 \text{ k}\Omega, \quad (6.1)$$

s rezervou bola zvolená hodnota 20 k Ω . Potrebná hodnota kondenzátoru C_{21} [19]

$$C_{21} = \frac{-40 \cdot 10^{-3}}{R_{22} \cdot \ln\left(\frac{1}{9}\right)} = \frac{-40 \cdot 10^{-3}}{20\,000 \cdot \ln\left(\frac{1}{9}\right)} = 0,91 \mu F. \quad (6.2)$$

Pre spoľahlivú funkciu bola zvolená kapacita 4,7 μF .

Maximálne výstupné napätie U_{OUTmax} je zložené z dvoch čiastkových napätí, z prahového napätia U_{TH} tranzistoru Q_6 a maximálneho napätia $U_{GATEmax}$ na hradle tranzistoru Q_6 , ktoré generuje obvod LTC4380 pomocou nábojovej pumpy. Napätie $U_{GATEmax}$ je o 12,5 V väčšie ako maximálne napájacie napätie U_{CCmax} obvodu LTC4380. Napätie U_{CCmax} je rovné Zenerovmu napätiu diódy D_5 . Z toho vyplýva, že maximálne

výstupné napätie U_{OUTmax} je možné nastaviť vhodnou voľbou Zenerovej diódy D_5 , ak je známe prahové napätie U_{TH} , ako ukazuje rovnica 6.3. [19]

Maximálne výstupné napätie U_{OUTmax} , teda napätie na vývode S tranzistoru Q_6 je rovné rozdielu $U_{GATEmax} - U_{TH}$. V stave, keď nie je ochrana aktívna a tranzistory Q_5 a Q_6 sú otvorené, sa výstupné napätie rovná vstupnému napätiu. V prípade, že toto napätie začne rásť, začne sa znižovať napätie U_{GSQ6} . Ak výstupné napätie rastie až nad hodnotu $U_{OUT} > U_{GSmax} - U_{TH}$, to znamená že napätie U_{GSQ6} klesne pod hodnotu U_{TH} tranzistor Q_6 sa uzavrie, čím odpojí pripojenú záťaž.

Bol zvolený rovnaký typ tranzistoru Q_5 a Q_6 IPB107N20N3 s parametrami $U_{TH} = 3,5$ V, $U_{(BR)DSS} = 200$ V, $I_{Dmax} = 88$ A a $R_{DSon} = 10,7$ m Ω [20]. Pre dosiahnutie maximálneho výstupného napätia 56 V bola zvolená dióda so Zenerovým napätím $U_Z = 47$ V. Výstupné napätie je

$$U_{OUTmax} = U_{Z(D5)} + 12,5 - U_{TH(Q6)} = 47 + 12,5 - 3,5 = 56 \text{ V} . \quad (6.3)$$

Ďalej je potrebné určiť výkonové zaťaženie R_{22} a D_5 pre prípad napät'ovej špičky. Prepät'ová ochrana je dimenzovaná na napätie 200 V dané napätím $U_{(BR)DSS}$ tranzistoru Q_6 . Prúd, ktorý bude tiecť odporom R_{22} a zároveň diódou D_5 pri vstupnom napätí 200 V je možné určiť nasledovne

$$I_{R22} = I_{D5} = \frac{200 - U_{Z(D5)}}{R_{22}} = \frac{200 - 47}{20 \cdot 10^3} = 7,65 \text{ mA} . \quad (6.4)$$

Potom je možné vypočítať stratový výkon pri vstupnom napätí 200 V zo známeho úbytku napätia daného Zenerovým napätím pre rezistor R_{22} nasledovne

$$P_{R22} = (200 - U_{Z(D5)}) \cdot I_{R22} = (200 - 47) \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} \doteq 1,17 \text{ W} \quad (6.5)$$

a pre diódu nasledovne

$$P_{D5} = U_{Z(D5)} \cdot I_{R22} = 47 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} \doteq 360 \text{ mW} . \quad (6.6)$$

Súčasťou prúdovej ochrany je rezistor snímajúci prúd. Podobne ako obvod LT8390 aj obvod LTC4380 používa napät'ovú referenciu s prahovou hodnotou 50 mV [8] [19]. Odpor potrebného snímacieho rezistoru pre obmedzenie prúdu na 15 A je daný nasledovne

$$R_{SNS} = \frac{0,05}{I_{MAX}} = \frac{0,05}{15} \doteq 3,33 \text{ m}\Omega , \quad (6.7)$$

Bol zvolený rezistor s odporom 3,5 m Ω , ktorý obmedzí prúd približne na 14,3 A. V prípade závažného skratu, keď výstupné napätie klesne pod 1,5 V sa zmení prahová hodnota napätia na 62 mV [19]. V tomto prípade bude prúd limitovaný na približne 17,7 A.

Pre správnu funkciu obvodu je potrebné zvoliť rezistor R_{17} s takou hodnotou odporu, aby ním pri napät'ovej špičke 200 V tiekol prúd 1 mA [19].

$$R_{17} = \frac{U_{INmax} - U_{OUTmax}}{0,001} = \frac{200 - 56}{0,001} = 144 \text{ k}\Omega . \quad (6.8)$$

Približnú hodnotu času potrebného na plné otvorenie tranzistorov Q_5 a Q_6 počas bežnej prevádzky je možné určiť nasledovne [19]

$$t_{\text{INRUSH}} = U_{\text{INmax}} \cdot \frac{C_{22}}{I_{\text{GATE(UP)}}} = 48 \cdot \frac{47 \cdot 10^{-9}}{20 \cdot 10^{-6}} \doteq 112,8 \text{ ms} . \quad (6.9)$$

Počas otvárania pracuje tranzistor v odporovom režime a vzniká na ňom stratový výkon, preto je vhodné zvoliť kondenzátor CTMR dostatočne malý, aby sa tranzistor nachádzal v odporovom režime čo najkratšie a zároveň dostatočne veľký aby obvod fungoval správne [19]

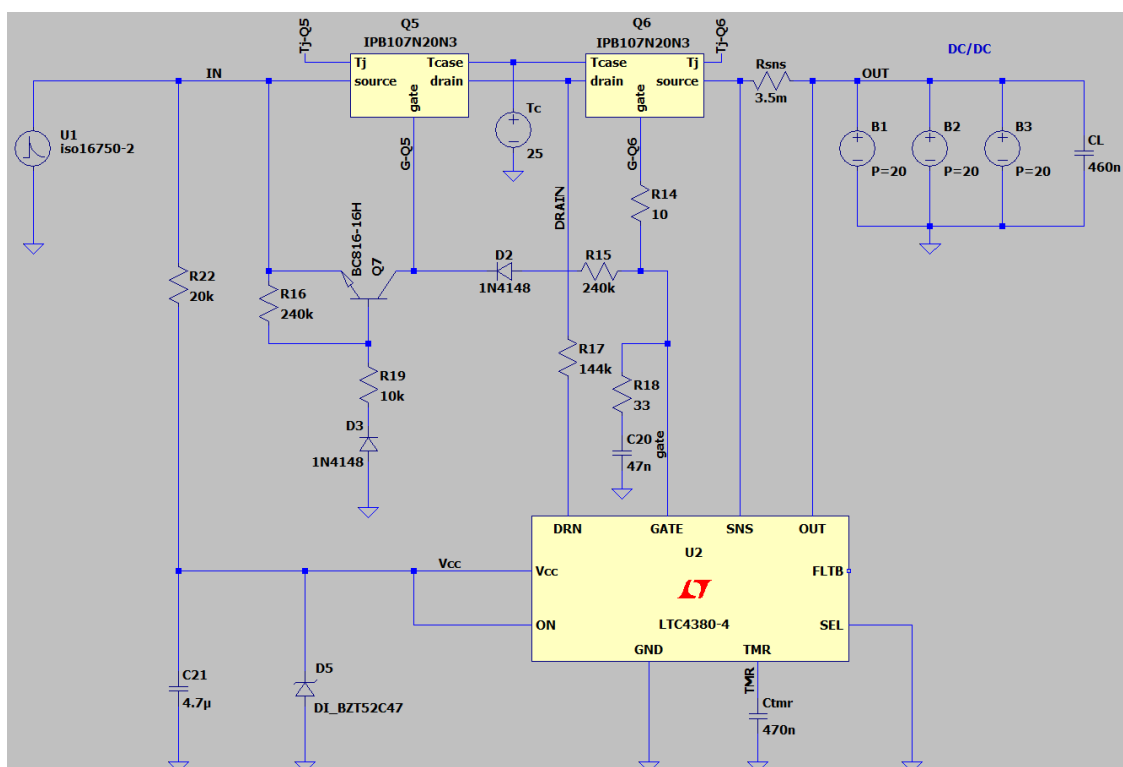
$$C_{\text{TMR}} = \frac{I_{\text{TMRup}} \cdot t_{\text{INRUSH}}}{U_{\text{TMR}}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 112,8 \cdot 10^{-3}}{0,4} \doteq 423 \text{ nF} . \quad (6.10)$$

Hodnota kapacity C_{TMR} bola zaokrúhlená na 470 nF. Zvyšné hodnoty súčiastok sú zvolené podľa odporúčaní výrobcu. Navrhnutý obvod vstupnej ochrany je možné vidieť v schéme zariadenia v prílohe B. Počas spracovávanía tejto témy nebol tranzistor IPB107N20N3 dostupný, preto bol dočasne nahradený tranzistorom BSC070N10NS5. Táto zmena najviac ovplyvní maximálnu hodnotu prepäťovej ochrany z toho dôvodu, že napätie $U_{\text{BR(DSS)}}$ tranzistoru BSC070N10NS5 je len 100 V [13].

6.2 Overenie funkcie vstupnej ochrany pomocou simulácie

Napätie v automobilových rozvodoch nie je počas prevádzky stabilné, môžu sa v ňom vyskytnúť prechodné javy, ako sú napäťové špičky alebo pokles napätia pod nominálnu hodnotu. Charakteristické vlastnosti týchto prechodných javov vyskytujúcich sa v rozvodoch s nominálnym napätím 12 a 24 V sú definované v norme ISO 16750-2. [21]

Táto práca sa zameria overenie správnej funkcie prepäťovej ochrany navrhnutého ochranného obvodu simuláciou dvoch prechodných javov, definovaných v norme ISO 16750-2, ďalej sa zameria na overenie funkcie ochrany voči opačnej polarite napätia a funkcie nadprúdovej ochrany. Ako ukazuje obrázok 6.1, na vstupe navrhnutého ochranného obvodu je pripojený zdroj napätia U1 simulujúci prechodové javy v rozvodoch definované normou ISO 16750-2. Na výstupe je pripojená záťaž simulujúca DC/DC menič navrhnutý v kapitole 5. Záťaž je zložená zo vstupnej kapacity DC/DC meniča CL a behaviorálneho zdroja B, ktorý z výstupu ochranného obvodu odoberá výkon 60 W. Kvôli problémom s konvergenciou počas simulácie bol behaviorálny zdroj B rozdelený na tri samostatné zdroje zapojené paralelne, z ktorých každý odoberá výkon 20 W. V simulácii sú sledované časové priebehy vstupného napätia $V(\text{in})$, výstupného napätia $V(\text{out})$, výstupného prúdu $I(\text{Rsns})$, napätia na časovacom kondenzátore $V(\text{tmr})$ a teploty prechodu T_j tranzistoru Q_6 $V(\text{tj-q6})$.

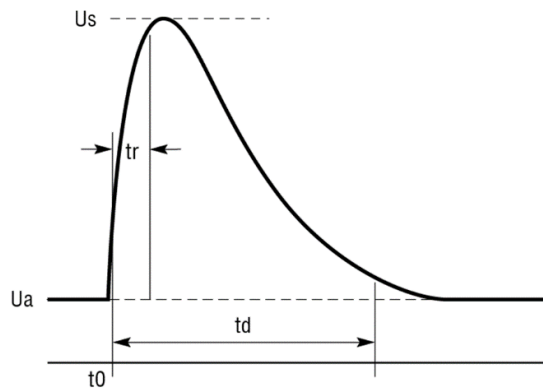


Obrázok 6.1 Navrhnutý obvod vstupnej ochrany s LTC4380-4

V programe LTspice bol využitý model tranzistoru IPB107N20N3, ktorý simuluje zmenu teploty prechodu T_j v závislosti na stratovom výkone na tranzistore. Teplota puzdra T_c bola nastavená na 25 °C pripojením zdroja napätia s hodnotou 25 V na vývod T_{case} . Teplota prechodu T_j nesmie počas simulácie prekročiť 175 °C, pri ktorej by došlo k zničeniu tranzistoru [20]. Vzhľadom na podstatu použitého modelu je meraná teplota zobrazovaná ako napätie a má spoločnú napäťovú os s ostatnými zobrazovanými napäťovými signálmi.

6.2.1 Simulácia funkcie prepät'ovej ochrany

Prepätie sa v automobilovom rozvode môže vyskytnúť v prípade, ak alternátor dobíja batériu a z určitých dôvodov dôjde k odpojeniu batérie od rozvodu, napríklad poškodením vedenia. V tomto momente vznikne napäťová špička, ktorá môže poškodiť pripojené zariadenia. Ak alternátor nie je vybavený diódami obmedzujúcimi napätie, môže napätie vzrásť až na hodnotu 200 V. Obrázok 6.2 ukazuje priebeh napäťového pulzu s definujúcimi parametrami používaného v teste ISO 16750-2:2012 §4.6.4. [21]



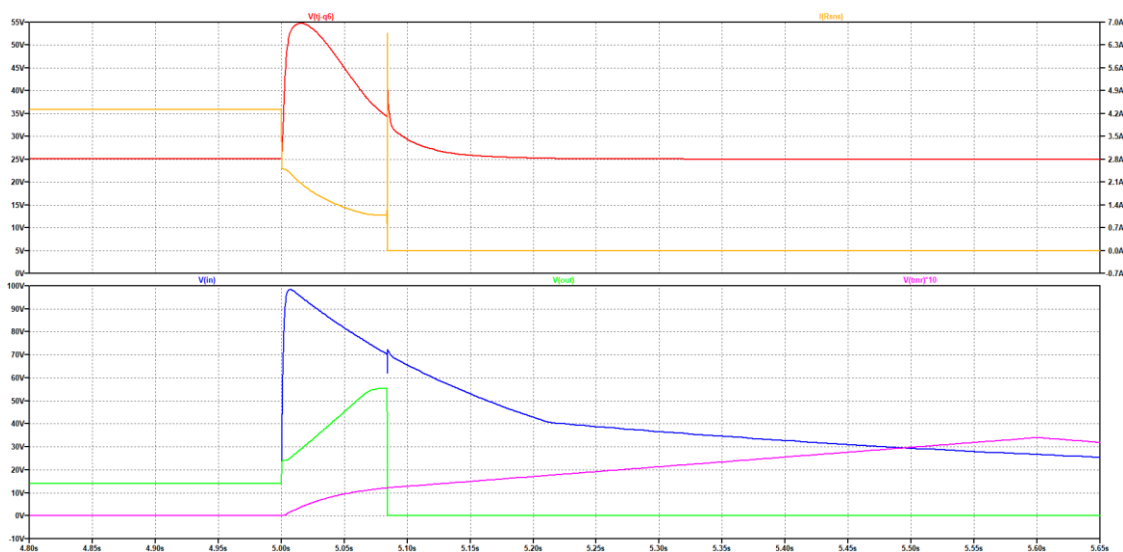
Obrázok 6.2 Charakteristika napät'ového pulzu v automobilových rozvodoch, prevzaté z [21]

Parametre napät'ového pulzu sa líšia v závislosti na nominálnom napätí automobilového rozvodu [21]. V simulácii je na vstup navrhnutého zariadenia pripojený preddefinovaný zdroj pulzu z knižnice LTspice s parametrami definovanými v tabuľke 6.1. Táto podkapitola je zameraná na simuláciu napät'ového pulzu v rozvodoch s nominálnym napätím U_n 12 a 24 V.

Tabuľka 6.1 Parametre napät'ového pulzu v testovaných napätíach rozvodov, prevzaté z [21]

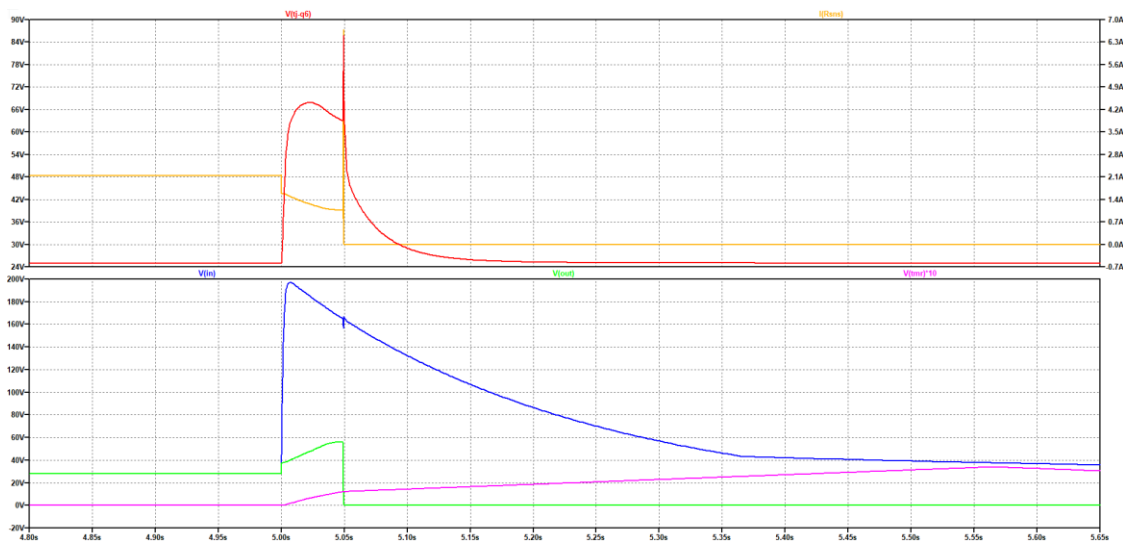
U_n [V]	U_a [V]	U_s [V]	t_d [ms]	t_r [ms]	R_i [Ω]
12	14	101	400	5	0,5
24	28	202	300	5	1

Časové priebehy sledovaných veličín pri napät'ovom pulze v rozvode s napätím 12 V sú zobrazené na obrázku 6.3. Kvôli lepšej prehľadnosti je signál $V(t_{mr})$ zväčšený 10-krát. Z obrázku je zrejmé, že počas napät'ovej špičky obvod udržiava výstupné napätie pod stanovenou hodnotou 56 V. So zmenou výstupného napätia sa mení aj odoberaný prúd tak, aby bol odoberaný výkon konštantný na úrovni 60 W. Počas trvania napät'ovej špičky vzniká na tranzistore stratový výkon rovný súčinu rozdielu vstupného a výstupného napätia a odoberaného prúdu, ktorý postupne zahrieva prechod tranzistoru, a ten dosiahne pred aktivovaním ochrany teplotu $T_j = 55$ °C. Integrovaný obvod vyhodnotí tento stav ako poruchu a začne nabíjať kondenzátor C_{tmr} , na ktorom sa začne zvyšovať napätie. Ak toto napätie dosiahne hodnotu $V(t_{mr}) = 1,215$ V obvod uzavrie tranzistory čím odpojí pripojenú záťaž [19]. Nasleduje 15 cyklov postupného nabíjania a vybíjania časovacieho kondenzátoru konštantným prúdom, počas ktorých je záťaž odpojená, obvodom neprechádza prúd a tranzistor chladne [19]. Po ukončení chladiaceho cyklu obvod znova pripojí záťaž. V prípade pretrvávajúcej poruchy sa cyklus opakuje. Nabíjací prúd kondenzátora počas napät'ovej špičky pred tým, ako napätie dosiahne 1,215 V, nie je konštantný, čo je možné usúdiť aj z priebehu napätia $V(t_{mr})$. Dôvodom je fakt, že obvod LTC4380 dokáže vyhodnotiť veľkosť stratového výkonu na tranzistore a na základe toho buď zväčšiť alebo zmenšiť nabíjací prúd [19]. To zabezpečí rýchlejšie nabitie kondenzátora a rýchlejšie prerušenie prúdu pri väčších stratových výkonoch.



Obrázok 6.3 Sledované veličiny prepäťovej ochrany po privedení pulzu s parametrami pre rozvod s nominálnym napätím $U_n = 12\text{ V}$

Na obrázku 6.4 sú časové priebehy sledovaných veličín pri simulácii napäťového pulzu v rozvode s nominálnym napätím 24 V. Funkcia obvodu je rovnaká ako pri simulácii pulzu v rozvode s napätím 12 V. Rozdiel je vo väčšom stratovom výkone na tranzistore Q_6 , z dôvodu väčšieho rozdielu vstupného a výstupného napätia. Dôsledkom je väčšia dosiahnutá teplota prechodu $T_j = 86\text{ }^\circ\text{C}$ a zároveň rýchlejšie odpojenie záťaže spôsobené väčším nabíjajúcim prúdom časovacieho kondenzátora C_{TMR} .

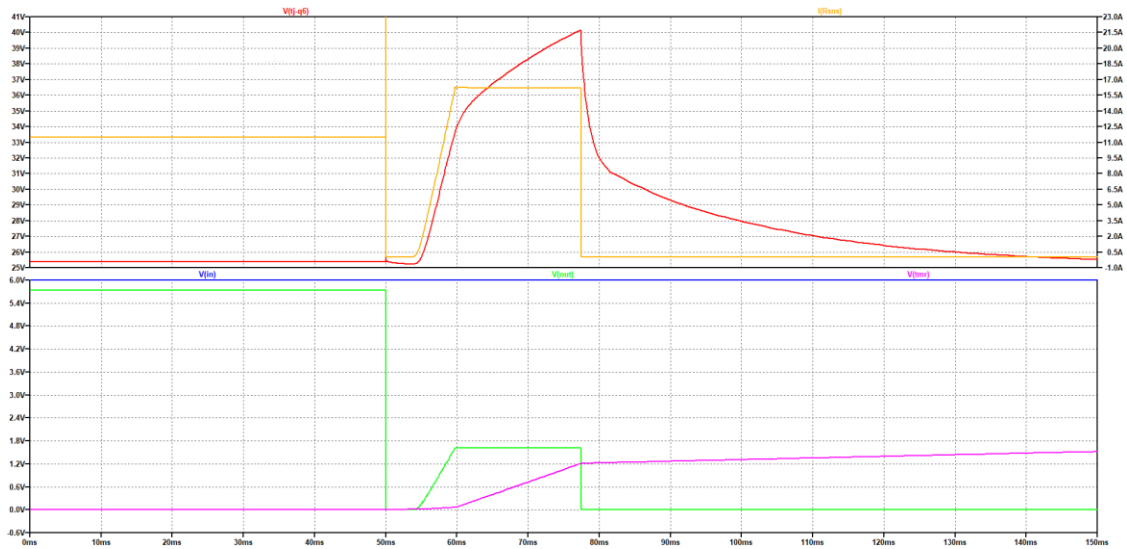


Obrázok 6.4 Sledované veličiny prepäťovej ochrany po privedení pulzu s parametrami pre rozvod s nominálnym napätím $U_n = 24\text{ V}$

6.2.2 Simulácia funkcie nadprúdovej ochrany

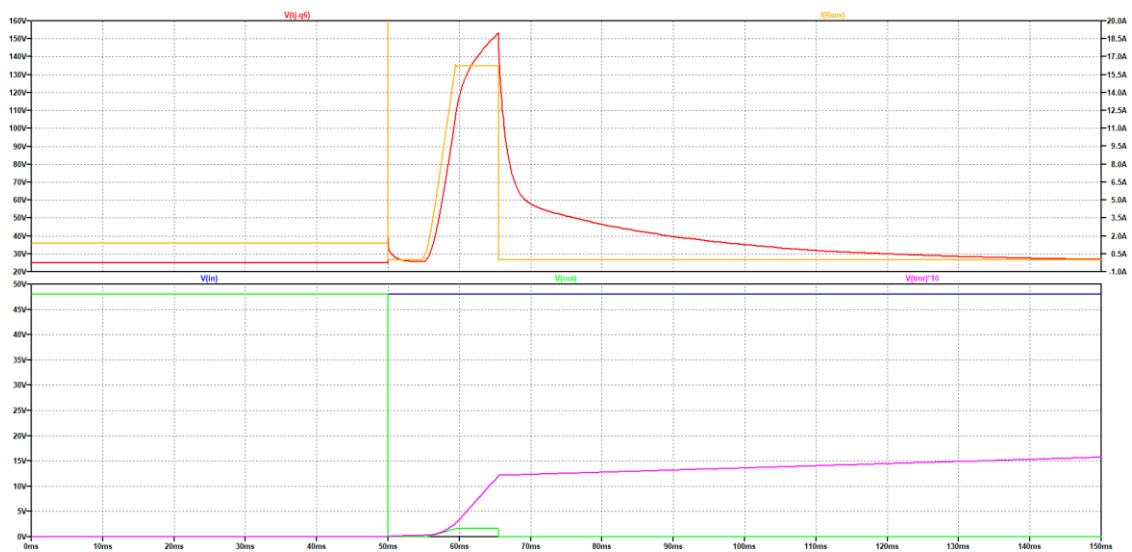
V tejto podkapitole je simulovaný stav, v ktorom dôjde počas prevádzky ku skratu na strane vstupu DC/DC meniča. Pre porovnanie výsledkov v rôznych režimoch je simulovaná funkcia obvodu so vstupným napätím 48 V, pri ktorom tečie do obvodu najmenší prúd a funkcia obvodu so vstupným napätím 6 V, pri ktorom tečie do obvodu najväčší prúd. V oboch prípadoch bude na výstup ochranného obvodu pripojená impedancia s veľkosťou 0,1 Ω .

Ako je možné vidieť na obrázku 6.5, po pripojení nízkej impedancie v čase $t = 50$ ms, obvod obmedzí prúd na hodnotu 16,2 A a napätie na výstupe je úmerné veľkosti tohto prúdu a veľkosti záťaže. V tomto stave je stratový výkon na tranzistore Q_6 konštantný, pretože je konštantný rozdiel vstupného a výstupného napätia výstupný prúd. V momente aktivovania ochrany dosiahne teplota prechodu T_j tranzistoru Q_6 40,2 $^{\circ}\text{C}$.



Obrázok 6.5 Sledované veličiny nadprúdovej ochrany so vstupným napätím 6 V po pripojení nízkej impedancie

Na obrázku 6.6 je možné vidieť, že po pripojení nízkej impedancie pri vstupnom napätí 48 V vznikne na tranzistore Q_6 väčší úbytok napätia než v prípade so vstupným napätím 6 V, čo sa prejaví na väčšej teplote prechodu T_j , v tomto prípade $T_j = 153$ $^{\circ}\text{C}$. Rovnako sa skrúti čas do odpojenia záťaže.

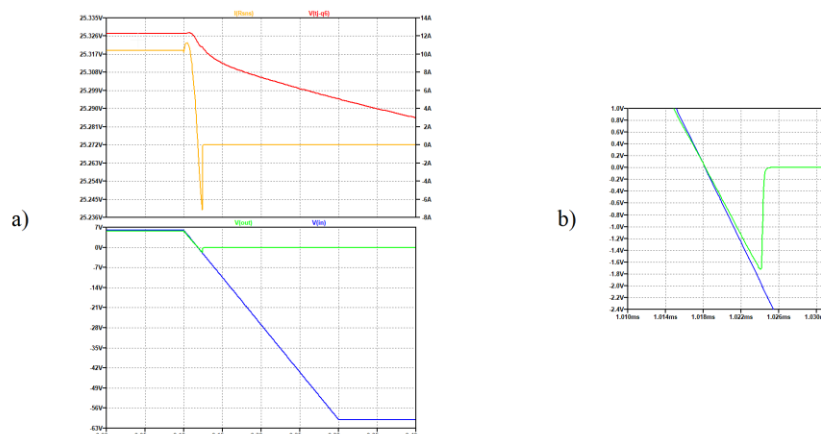


Obrázok 6.6 Sledované veličiny nadprúdovej ochrany so vstupným napätím 48 V po pripojení nízkej impedancie

6.2.3 Simulácia ochrany proti reverznej polarite napájania

Reverzná polarita napätia, alebo napätie menšie než 0 V sa môže v automobilovom rozvode vyskytnúť najčastejšie dvoma spôsobmi. Môže sa tak stať, ak je batéria chybou operátora pripojená na opačné svorky. Ďalším možným javom je výskyt negatívneho napät'ového pulzu v prípade, ak induktívnou záťažou v rozvode tečie prúd a pôsobením poruchy dôjde k prerušeniu tohto prúdu. Dôsledkom je indukované napätia opačnej polarity voči pôvodnému napätiu na induktívnej záťaži. [21]

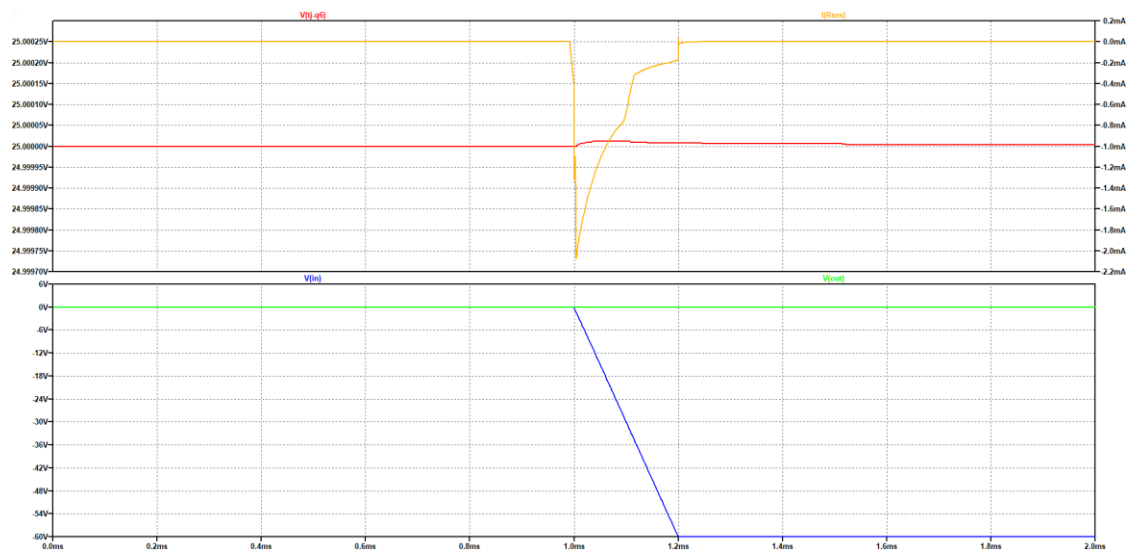
Sú simulované oba spôsoby výskytu negatívneho napätia v rozvode. Obrázok 6.7a) zobrazuje privedenie negatívneho pulzu s napätím -60 V a s nástupnou hranou 200 μs na vstup ochranného obvodu v pracovnom stave s napájaním 6 V. Obrázok 6.7b) ukazuje zväčšený časový úsek v momente, keď vstupné napätie prechádza nulou.



Obrázok 6.7 a) Sledované veličiny ochrany proti reverznej polarite napájania pri zmene napätia zo 6 na -60 V, b) zväčšený úsek v čase prechodu vstupného napätia nulou

Je možné vidieť, že výstupné napätie na určitý moment (približne 3 μ s) klesne pod hodnotu 0 V a dosiahne hodnotu až -1,7 V. Takéto napätie by mohlo v praxi potenciálne poškodiť elektrolytické kondenzátory pripojené na výstup ochranného obvodu. Integrovaný obvod lineárneho regulátora LT3012 pripojený k výstupu dokáže zvládnuť záporne napätie až do hodnoty -60 V [22]. Riadiaci obvod DC/DC meniča LT8390 nemá v katalógovom liste definovaný záporný rozsah vstupného napätia, preto možno predpokladať, že záporne napätie by mohlo poškodiť aj tento obvod.

Pri poklese vstupného napätia spôsobeného pripojením batérie na svorky opačnou polaritou zostáva výstupné napätie na nule, bez poklesu do záporných hodnôt, ako ukazuje obrázok 6.8. Pred privedením pulzu je obvod v neaktívnom stave a na vstupe je nulové napätie.



Obrázok 6.8 Sledované veličiny ochrany proti reverznej polarite napájania pri zmene napätia zo 0 na -60 V

7. VYUŽITIE MIKROKONTROLÉRU ARDUINO

Navrhnutý obvod je nutné doplniť o vhodný spôsob ovládania výstupného napätia. Bola zvolená implementácia mikrokontroléru typu Arduino, ktorý je možné doplniť o ďalšie periférne zariadenia.

7.1 Výber modulu a ostatných komponentov

Existujú rôzne moduly, ktoré sa líšia predovšetkým použitým typom mikrokontroléru. Každý mikrokontrolér disponuje určitou veľkosťou pamäte pre program a premenné a rôznym počtom vstupno-výstupných vývodov. Spracovávaná aplikácia si vystačí s pomerne jednoduchým kódom, ktorý nekladie veľké nároky na veľkosť pamäte. Zároveň si vystačí s malým množstvom digitálnych a analógových vstupno-výstupných vývodov a I²C zbernicou pre komunikáciu s ostatnými komponentmi.

Bol zvolený modul Arduino Nano. Tento modul využíva mikrokontrolér ATmega328P vyvinutý spoločnosťou Atmel, ktorý disponuje ôsmimi analógovými vývodmi, štrnástimi digitálnymi vývodmi, I²C a SPI zbernicou. Modul patrí medzi najmenšie moduly od spoločnosti Arduino s rozmermi 48 x 18 mm, čo tiež vyhovuje požiadavkám z hľadiska kompaktnosti. [23]

Mikrokontrolér je doplnený o zobrazovaciu a ovládaciu časť. Ako zobrazovacia časť bol zvolený OLED displej veľkosti 0,96“ s rozlíšením 128 x 64 pixelov, komunikujúci cez I²C zbernicu. Výhodou tohto typu displeja oproti LCD displejom je väčšia hustota pixelov na jednotku plochy, čo umožní zobrazovať viac informácií pri využití menšieho priestoru. Ďalšou výhodou je fakt, že displej rozsvieti len potrebné pixely a nevyužíva podsvietenie, čo podstatne zníži jeho spotrebu. Ako ovládací prvok bol zvolený rotačný enkodér KY-040, ktorý pre komunikáciu s Arduinom využíva 3 digitálne vývody. Ovládanie pomocou enkodéru je veľmi intuitívne a je možné pomocou neho listovať v menu a potvrdiť výber.

7.2 Nastavenie výstupného napätia pomocou D/A prevodníku

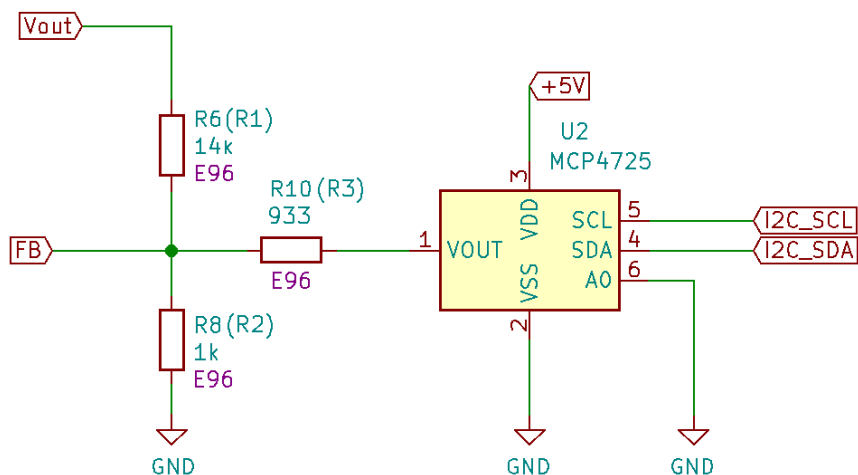
Mikrokontrolér pracujúci s číslicovými signálmi je nutné vhodne prepojiť s navrhnutým meničom, ktorý pracuje výlučne s analógovými signálmi. Možné spôsoby sú zhrnuté v kapitole 3.

Kvôli väčšej presnosti bol zvolený spôsob využívajúci D/A prevodník, konkrétne obvod MCP4725, ktorý je cenovo porovnateľný s digitálnymi potenciometrami. Jedná sa o 12-bitový prevodník s rozsahom výstupných napätí 0 V až U_{CC} . [24]

V tejto aplikácii bolo použité napájacie napätie U_{CC} na úrovni 5 V. Zapojenie prevodníku je na obrázku 7.1.

Pre nastavenie požadovaného výstupného napätia je využitá rovnica 3.5. Značenie rezistorov v rovnici je zhodné so značením rezistorov v zátvorke na obrázku 7.1. Nastavením napätia U_{DAC} v rozsahu 1 až 0 V je možné riadiť výstupné napätie v rozsahu 15 až 30 V. V prípade zvýšenia napätia U_{DAC} nad 1 V je možné výstupné napätie znížiť pod 15 V, čo môže byť využité pri budúcom vývoji zariadenia, napríklad na nastavenie výstupného napätia na hodnotu 5 V pre napájanie mobilných telefónov.

Namiesto rezistoru R10 bol pri realizácii zariadenia použitý viacotáčkový ladiaci potenciometer kvôli presnejšiemu nastaveniu pracovného bodu.



Obrázok 7.1 Zapojenie D/A prevodníku MCP4725 v obvode spätnej väzby navrhnutého DC/DC meniča

7.3 Program pre Arduino

Vo vývojovom prostredí Arduino IDE bol vytvorený program obsahujúci jednoduché menu s tromi položkami. Program vykresľuje na displej hlavné menu s tromi možnosťami, ktoré je možné vidieť na obrázku 7.2. V prvej časti si môže užívateľ zvoliť z databázy značku notebooku s prednastavenou hodnotou napájacieho napätia. V prípade potreby napätia, ktoré nie je uložené v databáze, môže užívateľ voľbou tretej položky „Voltage“ nastaviť ľubovoľné napätie z rozsahu 15 až 30 V s rozlíšením 0,5 V. Následne je možné uviesť menič do funkcie potvrdením položky „Enable“.



Obrázok 7.2 Zobrazované menu a jeho položky, zľava: hlavné menu, voľba značky laptopu, nastavenie požadovaného napätia

V prípade odpojenia zariadenia od napájania si zariadenie zapamätá poslednú voľbu značky notebooku, čo zjednoduší užívateľovi opakované používanie.

7.4 Napájanie mikrokontroléru a periférií

Pre svoju funkciu vyžaduje mikrokontrolér a ostatné súčasti napätie 5 V. Prúdová spotreba mikrokontroléru, enkodéru, displeja a D/A prevodníku v prevádzke bola zameraná na úrovni približne 25 mA. Pri takto nízkej spotrebe je vhodné použiť lineárny regulátor, ktorý zo svojej podstaty nie je taký efektívny ako DC/DC menič, ale napriek tomu vyžaduje len niekoľko externých komponentov a nezaberá veľa miesta.

Keďže vstupný prúd lineárneho regulátora je rovný výstupnému prúdu, je stratový výkon daný súčinom tohto prúdu a rozdielu vstupného a výstupného napätia. Účinnosť a stratový výkon lineárneho regulátora je možné popísať touto rovnicou

$$\eta = \frac{U_{OUT} \cdot I}{U_{IN} \cdot I} = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \Rightarrow P_D = (U_{IN} - U_{OUT}) \cdot I. \quad (7.1)$$

Z rovnice 7.1 vyplýva, že straty budú najväčšie pri najväčšom vstupnom napätí a najnižšie pri najnižšom vstupnom napätí. Pri vstupnom napätí 48 V bude stratový výkon dosahovať približne 1,08 W. Naopak navrhnutý DC/DC menič má závislosť strát na napätí opačnú, ako bolo ukázané v kapitole 5.6.4.

Bol zvolený lineárny regulátor LT3012 typu LDO s výstupným napätím 5 V, ktorý dokáže pracovať v celom rozsahu vstupných napätí a dokáže dodávať prúd až 250 mA. Jeho zapojenie je možné vidieť v schéme zariadenia v prílohe B.

7.5 Možné zlepšenie efektivity a riadenie výkonu meniča

Obvod LT8390 disponuje vývodom CTRL, pomocou ktorého je možné meniť prahovú hodnotu napätia U_{IS} snímajúceho výstupný prúd. Pripojením napätia U_{CTRL} na vývod CTRL vyššieho ako 1,35 V dosiahne napäťová referencia U_{IS} hodnotu 100 mV. Pripojením napätia v rozsahu 0,3 až 1,15 V je hodnota napäťovej referencie daná vzťahom [8]

$$U_{IS} = \frac{U_{CTRL} - 0,25}{10} \text{ [V]}. \quad (7.2)$$

Využitím ďalšieho D/A prevodníku by bolo možné pomocou mikrokontroléru meniť prahové napätie U_{IS} a tým dosiahnuť určité zmeny v chovaní meniča.

Pri nízkom vstupnom napätí by bolo možné obmedziť výstupný prúd, čím by sa zmenšil výstupný výkon, vstupný výkon a zároveň vstupný prúd. Túto situáciu by bolo možné využiť v prípade, ak by veľký vstupný prúd vplyvom úbytku napätia na vnútornom sériovom odpore zdroja obmedzoval celkové použitie zariadenia, ako bolo popísané v kapitole 5.6.1.

Rovnakým spôsobom by bolo možné znížiť výkonové straty spôsobené vysokým vstupným prúdom, čím by sa zvýšila efektívnosť zariadenia pri nízkom napájacom napätí.

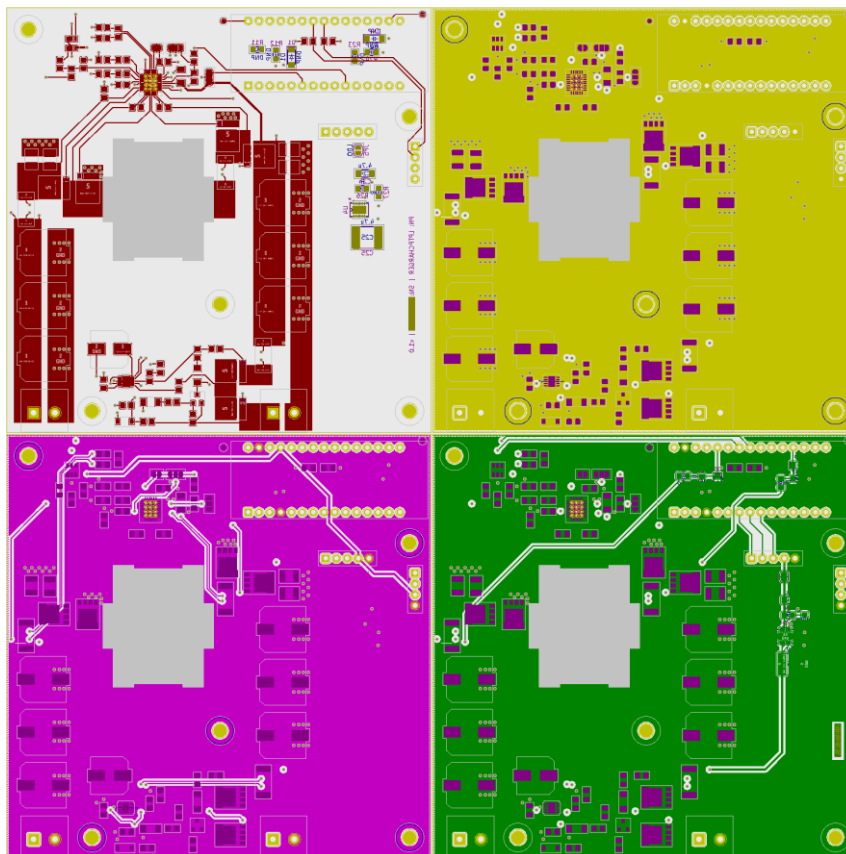
V opačnom prípade, pri vstupnom napätí 48 V, keď do obvodu netečie tak veľký prúd, by zvýšením napäťovej referencie bolo možné zvýšiť výstupný prúd a zároveň výkon nad 60 W.

Pre zakomponovanie tejto funkcie do obvodu by bolo nutné vhodným spôsobom snímať vstupné napätie, ktoré by mikrokontrolér vyhodnotil a na základe neho upravil pomocou D/A prevodníku napäťovú referenciu U_{IS} . Prípadne by určitá možnosť výberu funkcie bola zakomponovaná do menu a prenechaná na posúdení užívateľa. Možnosť ovládania výstupného výkonu nie je v tejto práci riešená, je možné ju doplniť v budúcom vývoji zariadenia.

8. REALIZÁCIA ZARIADENIA

8.1 Návrh DPS

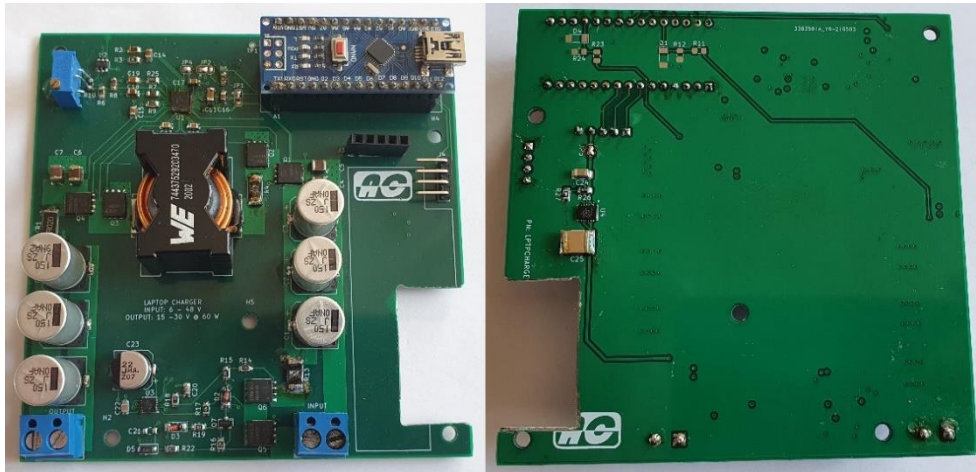
Doska plošných spojov bola navrhnutá v programe KiCAD. Vzhľadom na väčšiu komplikovanosť obvodu bola využitá štvorvrstvá doska, na ktorej je kombinovaná THT a SMD montáž súčiastok. Prehľad vrstiev a rozloženie súčiastok je zobrazené na obrázku 8.1. Pri návrhu bolo potrebné dodržať určité návrhové zásady, ktoré zabezpečili správnu funkciu obvodu v celom rozsahu požadovaných parametrov. Najdôležitejšie pravidlá návrhu DPS sú zhrnuté v katalógových listoch použitých integrovaných obvodov [8] [19]. Výhodou použitia štvorvrstvej dosky je možnosť čiastočného odtienenia malosignálových častí citlivých na rušenie od výkonových spínacích častí. To bolo dosiahnuté umiestnením citlivých spojov do tretej vrstvy, ktorá je z oboch strán tienená rozliatou med'ou spojenou so zemou. Dôležité bolo použiť Kelvinovo spojenie rezistorov snímajúcich prúd s integrovaným obvodom, čo zaistilo presné snímanie prúdu.



Obrázok 8.1 Prehľad vrstiev navrhutej DPS, horný rad zľava: prvá (vrchná) a druhá vrstva, dolný rad zľava: tretia a štvrtá (spodná) vrstva

8.2 Osadenie súčiastok

Na malé spájkovacie plôšky bola nanosená spájkovacia pasta, do ktorej boli uložené malé súčiastky. K zospájkovaniu došlo pretavením pasty „hot plate“ metódou. Zvyšné súčiastky, ako cievka a ostatné THT komponenty, boli pripevnené hrotovou spájkovačkou. Pri Bolo potrebné vyrezať v doske otvor, do ktorého bol následne umiestnený rotačný enkodér s nastavcom, tak aby nepresahoval vonkajší obrys puzdra. To čiastočne zabráni náhodnému pohybu alebo stlačeniu pri manipulácii so zariadením. Vyrezaný otvor je možné vidieť na obrázku 8.2, umiestnenie plastového nastavca je zobrazené na obrázku 8.3.



Obrázok 8.2 Vrchná a spodná strana osadenej DPS

8.3 Puzdro

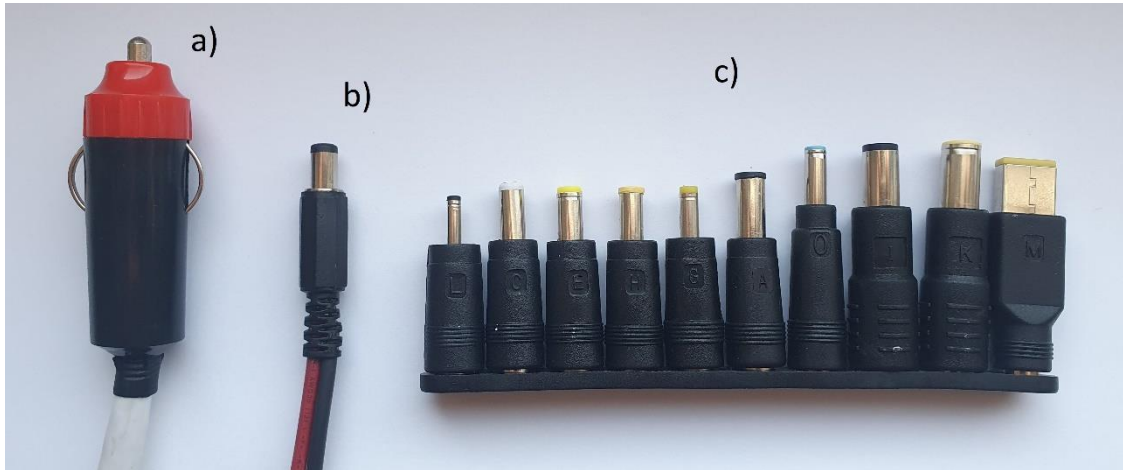
Puzdro bolo navrhnuté v programe SolidWorks a vytlačené z plastu PLA na 3D tlačiarňi. Je zložené z dvoch častí, ktoré sú spojené piatimi skrutkami veľkosti M3. V spodnej časti je uložená DPS, chladienie zariadenia je zabezpečené niekoľkými otvormi po stranách krytu. Vo vrchnej časti je umiestnený displej s rotačným enkodérom.



Obrázok 8.3 Zariadenie umiestnené v navrhnutom puzdre

8.4 Konektory k zariadeniu

Zdroj bol doplnený sadou desiatich konektorov kompatibilných s rôznymi značkami notebookov, ktoré je možné vidieť na obrázku 8.4c). Z výstupu vedie štandardizovaný DC konektor veľkosti 5,5 mm dimenzovaný na výstupné hodnoty napätia a prúdu, ku ktorému je možné pripojiť ľubovoľný z desiatich nastavcov. Tento konektor je zobrazený na obrázku 8.4b). Na obrázku 8.4a) je štandardný konektor do automobilov s 12 V rozvodmi, ktorý je pripojený k vstupu zariadenia. V ďalšom vývoji zariadenia môže byť tento konektor nahradený typom, ktorý obsahuje tavnú poistku, čím sa zvýši bezpečnosť zdroja v prípade zlyhania navrhutej vstupnej ochrany.



Obrázok 8.4 Konektory k zariadeniu: a) vstupný konektor pre 12 V rozvody, b) výstupný konektor, c) sada konektorov k notebookom

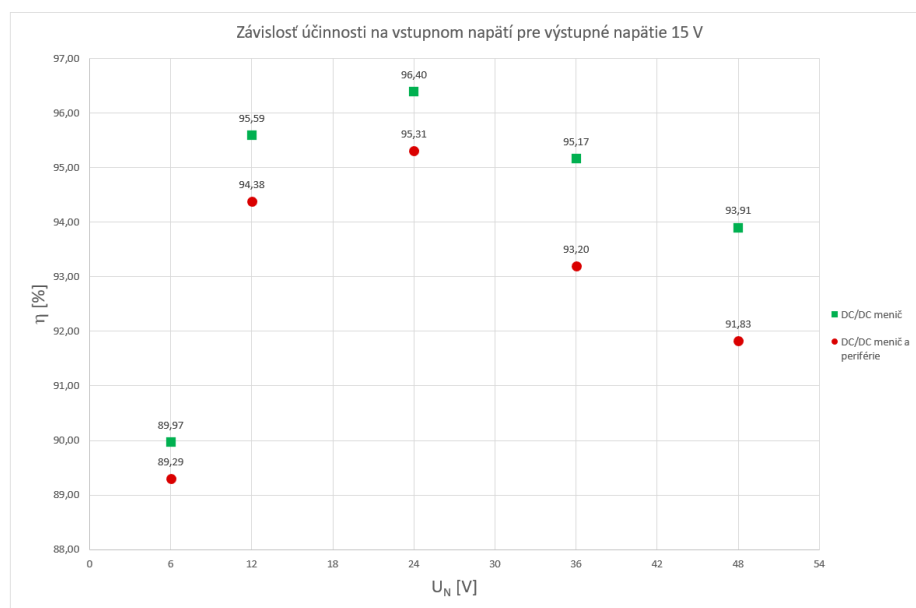
9. PRAKTICKÉ OVERENIE FUNKCIE

Po zhotovení zariadenia bola zmeraná účinnosť a zvlnenie výstupného napätia a tieto hodnoty boli porovnané s hodnotami dosiahnutými v simulácii.

9.1 Účinnosť zariadenia

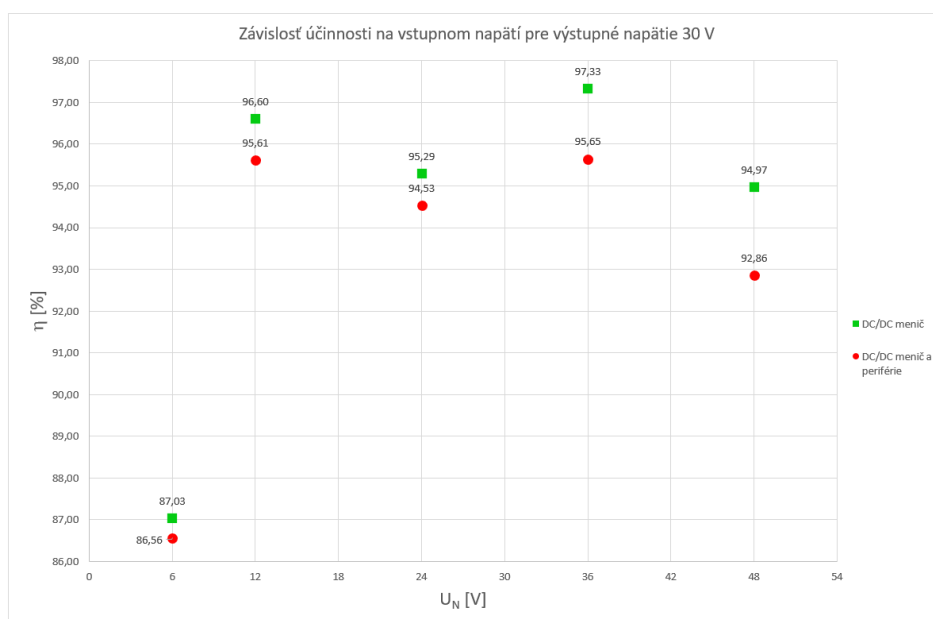
Účinnosť zariadenia bola meraná pri piatich nominálnych napätiach rozvodov, v ktorých môže zariadenie pracovať. Ako záťaž bolo použité zapojenie výkonových rezistorov s celkovou hodnotou odporu približne 3,7 a 15 Ω . Pri napájacom napätí 6 V bol použitý väčší zaťažovací odpor, tak aby vstupný prúd neprekročil 10 A. Dôvodom bolo prúdové obmedzenie použitých meracích prístrojov a napájacieho zdroja touto hodnotou. Namerané hodnoty napätí, prúdov a dopočítaných účinností sú uvedené v prílohe A.

Pre porovnanie účinnosti meniča s výsledkami zo simulácie v kapitole 5.6 boli zmerané hodnoty bez pripojeného LDO regulátoru a ostatných periférii, akými sú Arduino, OLED displej a enkodér. Následne bola zmeraná účinnosť celého zariadenia s pripojenými perifériami, kde sa prejavili straty LDO regulátoru.



Obrázok 9.1 Závislosť účinnosti na vstupnom napätí pre výstupné napätie 15 V

Z oboch grafov je zrejмый vplyv zväčšujúcich sa výkonových strát LDO regulátoru so zväčšujúcim sa vstupným napätím. Z grafu na obrázku 9.2 je možné pri vstupnom napätí 48 V odčítať maximálny stratový výkon na LDO regulátore, ktorý dosahuje hodnotu 2,11 W.



Obrázok 9.2 Závislosť účinnosti na vstupnom napätí pre výstupné napätie 30 V

Namerané hodnoty účinnosti DC/DC meniča v praxi v porovnaní s hodnotami dosiahnutými v simulácii pre výstupné napätie 15 V ukazuje tabuľka 9.1 a hodnoty pre výstupné napätie 30 V sú zhrnuté v tabuľke 9.2.

Je možné vidieť, že pri každom meraní bola v praxi dosiahnutá vyššia účinnosť než v simulácii. To môže byť z veľkej časti spôsobené vyššími stratami na tranzistoroch s vyšším odporom R_{DSon} použitých v simulácii. Ďalším dôvodom môže byť nepresnosť simulačných modelov jednotlivých súčiastok.

Z hodnôt je zrejмый rovnaký trend v oboch meraniach, pri ktorom dosahuje menič najvyššiu účinnosť približne v strede rozsahu napájacieho napätia a pri okrajoch účinnosť klesá. Ako bolo dokázané v simulácii, najnižšiu účinnosť dosahuje menič práve pri najnižšom vstupnom napätí, kedy to obvodu tečie najväčší prúd a vznikajú najväčšie výkonové straty.

Tabuľka 9.1 Namerané hodnoty účinností meniča v praxi a v simulácii pri výstupnom napätí 15 V

U _{IN} [V]	6	12	24	36	48
η _{SIM} [%]	87,88	91,74	94,54	91,83	90,94
η _{PRAX} [%]	89,97	95,59	96,40	95,17	93,91

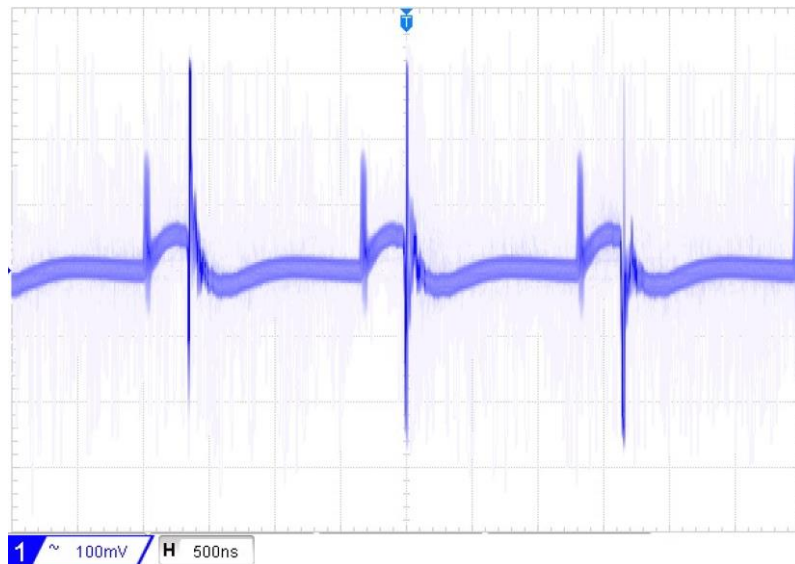
Tabuľka 9.2 Namerané hodnoty účinností meniča v praxi a v simulácii pri výstupnom napätí 30 V

U _{IN} [V]	6	12	24	36	48
η _{SIM} [%]	83,65	93,17	92,00	95,74	94,79
η _{PRAX} [%]	87,03	96,60	95,29	97,33	94,97

9.2 Zvlnenie výstupného napätia

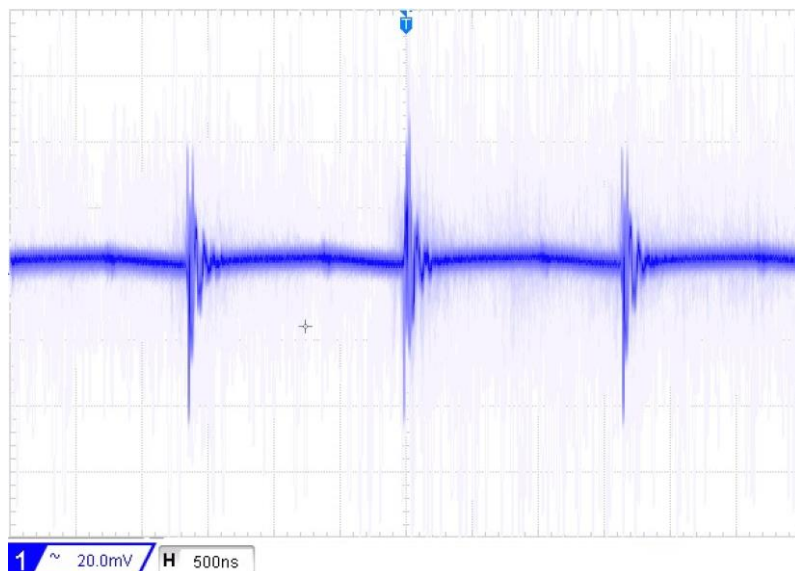
V tejto časti práce sú zobrazené časové priebehy najväčšieho zvlnenia napätia v dvoch režimoch, zvyšné hodnoty sú zhrnuté v tabuľke 9.3 a porovnané s hodnotami dosiahnutými v simulácii.

Obvod dosahuje najväčšie zvlnenie výstupného napätia v režime boost pri vstupnom napätí 6 V a výstupnom napätí 30 V. Zvlnenie dosahuje hodnotu $\Delta U_{OUTp-p} = 550$ mV a jeho priebeh je možné vidieť na obrázku 9.3.



Obrázok 9.3 Zvlnenie výstupného napätia 30 V pri vstupnom napätí 6 V

V režime buck dosahuje obvod najväčšie zvlnenie výstupného napätia pri zmene napätie zo 48 na 30 V s hodnotou $\Delta U_{OUTp-p} = 87$ mV.



Obrázok 9.4 Zvlnenie výstupného napätia 30 V pri vstupnom napätí 48 V

Porovnanie veľkostí zvlnenia dosiahnutých v simulácii a v praxi je zhrnuté v tabuľke 9.3. Je zrejmé, že v praxi menič dosahuje rádovo väčšie zvlnenie. Dôvodom môže byť rušenie dané návrhom plošného spoja alebo nedostatočné vlastnosti výstupných kondenzátorov, ktorými môžu byť kapacita, odpor ESR, ale aj sériová indukčnosť ESL.

Tabuľka 9.3 Hodnoty zvlnenia výstupného napätia v závislosti na zmene napätia

	6 ⇒ 15	6 ⇒ 30	48 ⇒ 15	48 ⇒ 30
ΔU_{OUTp-p} (SIM) [mV _{p-p}]	59	64	1,05	1,14
ΔU_{OUTp-p} (PRAX) [mV _{p-p}]	482	550	80	87

9.3 Vstupná ochrana

Z dôvodu nedostatočného vybavenia, ktoré by umožňovalo simulovať napäťové pulzy uvedené v kapitole 6.2, bola funkcia vstupnej ochrany overená pripojením jednosmerného napätia veľkosti 60 a -55 V na vstup a skratom výstupu impedanciou 0,5 Ω.

Prepät'ová ochrana bola overená pripojením napätia s hodnotou 60 V. V tomto prípade fungovala ochrana správne, do obvodu tiekol len prúd prechádzajúci rezistorom R₂₂ a diódou D₅ a prúd napájajúci obvod LTC4380.

Po pripojení napätia s opačnou polaritou a veľkosťou -55 V fungovala ochrana tiež správne a do obvodu tiekol len minimálny prúd rádovo v jednotkách mA.

Rovnako bola funkčná nadprúdová ochrana. Po pripojení impedancie veľkosti 0,5 Ω obvod takmer okamžite uzatvoril tranzistory Q₅ a Q₆ bez ich citeľného zahriatia.

Zariadenie zostalo funkčné po niekoľkonásobnom overení všetkých typov ochrán.

10. ZÁVER

Cieľom tejto práce bolo navrhnúť napájací zdroj notebookov do automobilov schopný pracovať so vstupným napätím v rozsahu 6 až 48 V a s výstupným napätím v rozsahu 15 až 30 V. V prvej časti sa práca venuje návrhu DC/DC meniča s výstupným výkonom 60 W, ktorý je základom navrhovaného napájacieho zdroja. Bol zvolený riadiaci integrovaný obvod LT8390 od firmy Analog Devices. Na základe katalógového listu riadiaceho obvodu boli zvolené vhodné externé súčiastky s takými hodnotami, aby bol navrhnutý menič schopný pracovať v zadanom rozsahu parametrov. Pri návrhu meniča a výbere súčiastok bol kladený dôraz na malé rozmery navrhovaného zdroja.

Funkcia navrhnutého DC/DC meniča bola overená simuláciou v programe LTspice. V simulácii dosahoval menič účinnosť v rozsahu približne 83 až 95 % v závislosti na veľkosti vstupného napätia. Zvlnenie výstupného napätia dosahovalo hodnotu v rozsahu 1,05 až 64 mV_{p-p}, čo je menej ako maximálna hodnota 100 mV_{p-p} zvolená pri návrhu. Počas simulácie sa prejavil vplyv vnútorného sériového odporu napájacieho zdroja, ktorý obmedzuje použitie meniča pri nízkych napájacích napätiach so zdrojmi s vysokým sériovým odporom. Problémom je veľký úbytok napätia na tomto odpore spôsobený vysokými odoberanými prúdmi, čo má za následok nedostatočné napätie na vstupe meniča pre jeho funkciu. V ďalšej časti sa práca venuje možnému riešeniu tohto problému riadením výkonu a zároveň odoberaného prúdu pomocou mikrokontroléru.

Dôležitou časťou navrhovaného zdroja je vstupná ochrana. Vstupná ochrana bola navrhnutá na základe obvodu LTC4380 od firmy Analog Devices, a obsahuje ochranu voči prepätiu do 200 V, kedy vstupné napätie neprekročí hodnotu 56 V, ochranu voči reverznému napätiu do -60 V a nadprúdovú ochranu s maximálnou hodnotou vstupného prúdu 17,7 A pri závažnom skrate. Rovnako bol simulovaný v programe LTspice aj obvod vstupnej ochrany. Pri simulácii prepäťovej ochrany bola sledovaná schopnosť obvodu odolať napäťovým pulzom definovaným v norme ISO 16750-2, ktoré sa môžu vyskytnúť v automobilových rozvodoch.

Poslednou časťou návrhu bolo zakomponovanie mikrokontroléru na platforme Arduino, ktoré bolo doplnené OLED displejom a rotačným enkodérom. Bol vytvorený program pre Arduino, ktorý na displej vykresľuje menu s tromi položkami, cez ktoré si môže užívateľ zvoliť značku notebooku s prednastavenou hodnotou výstupného napätia alebo si nastaviť ľubovoľnú hodnotu výstupného napätia v rozsahu 15 až 30 V s krokom 0,5 V. Následne je možné menič zapnúť alebo vypnúť. Zmena výstupného napätia meniča je dosiahnutá zapojením D/A prevodníku MCP4725 v obvode spätnej väzby, ktorý komunikuje s Arduino cez I²C zbernicu. Napájanie mikrokontroléru, displeja a rotačného enkodéru je zabezpečené lineárnym LDO regulátorom, ktorý dokáže pracovať s napätím v celom rozsahu vstupného napätia. Pri prúdovej spotrebe napájaných komponentov s veľkosťou 25 mA dosahuje regulátor najväčšie straty pri napájanom napätí 48 V s hodnotou približne 1 W.

Schéma celého napájacieho zdroja je uvedená v prílohe B. Z tejto schémy bola v programe KiCAD navrhnutá štvorvrstvá doska plošných spojov. Pri návrhu DPS bolo nutné dbať na vhodné rozmiestnenie komponentov a rozloženie citlivých malosignálových spojov tak, aby neboli ovplyvnené rušením spôsobeným výkonovými spínacími časťami. To bolo dosiahnuté umiestnením citlivých spojov do tretej vrstvy, ktorá je z oboch strán tienená rozliatou med'ou spojenou so zemou. Skonstruovaný obvod bol umiestnený do plastového puzdra navrhnutého v programe SolidWorks a vytlačeného

na 3D tlačiarňi. Zariadenie bolo doplnené desiatimi typmi konektorov, ktoré sú kompatibilné s rôznymi značkami notebookov.

V poslednej časti sa práca venuje porovnaniu dosiahnutých hodnôt efektivity a zvlnenia výstupného napätia dosiahnutých v praxi s hodnotami zo simulácie. V praxi dosahuje DC/DC menič väčšiu účinnosť ako v simulácii a to pri každej meranej hodnote vstupného napätia. Účinnosť meniča v praxi sa pohybuje v rozsahu 87,03 až 97,33 %. Účinnosť celého zdroja vrátane mikrokontroléru, displeja a enkodéru napájaných LDO regulátorom sa pohybuje v rozsahu 86,56 až 96,61 %. Zvlnenie výstupného napätia prekračuje maximálnu stanovenú hodnotu $100 \text{ mV}_{\text{p-p}}$ a pri zmene napätia zo 6 na 30 V dosahuje až $550 \text{ mV}_{\text{p-p}}$.

Funkcia prúdovej ochrany bola v praxi overená len pripojením napätia s veľkosťou 60 a -55 V na vstup a skratovaním výstupu impedanciou $0,5 \Omega$, z dôvodu nedostatočného vybavenia pre simulovanie pulzov uvedených v norme ISO-16750-2. Vstupná ochrana sa prejavila ako funkčná.

LITERATÚRA

- [1] ŠPANĚL, P. *Zvyšující měnič napětí pro napájení notebooku z palubní sítě osobního automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních, 2009, s. 54. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Hejkrlík.
- [2] COUFAL, M. *DC/DC měnič pro světelný zdroj s LED*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019, s. 48. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.
- [3] MIKO, R. *Miniaturní zvyšující DC/DC měnič s velkou účinností*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, s. 61. Vedoucí bakalářské práce Ing. Dalibor Červinka, Ph.D.
- [4] CHUDÝ, Andrej. *Snižující DC/DC měniče s vysokou účinností*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních, 2019, s. 63. Vedoucí práce Ing. Petr Procházka, Ph.D.
- [5] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, INC.
www.maximintegrated.com. Digital adjustment of DC-DC converter output voltage in portable applications
[online]. [cit. 2021]. Dostupné z:
<https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/8/818.html>
- [6] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. www.ti.com.
Buck-boost & inverting *controllers* (external switch)/LM5176 [online]. [cit. 2020].
Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5176.pdf?ts=1622691175808&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM5176
- [7] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. www.ti.com.
Buck-boost & inverting *controllers* (external switch)/LM5118 [online]. [cit. 2020].
Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5118.pdf?ts=1622673034836&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM5118
- [8] ANALOG DEVICES, INC. www.analog.com.
External Power Switch Buck-Boost Controllers/LT8390 [online]. [cit. 2020].
Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt8390.pdf>
- [9] ANALOG DEVICES, INC. www.analog.com.
External Power Switch Buck-Boost Controllers/LT8392 [online]. [cit. 2020].
Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt8392.pdf>

- [10] ROHM CO., LTD. www.fscdn.rohm.com.
Application Note/Efficiency of Buck Converter [online]. 2021 [cit. 2021].
 Dostupné z: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/buck_converter_efficiency_app-e.pdf
- [11] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. www.ti.com.
Basic Calculations of a 4 Switch Buck-Boost Power Stage [online]. [cit. 2021].
 Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/slva535b/slva535b.pdf?ts=1622468953492&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [12] ROHM CO.,LTD. www.techweb.rohm.com.
Basic Knowledge/Example of Power Loss Calculation for a Power Supply IC [online].
 2019 [cit. 2021]. Dostupné z: https://techweb.rohm.com/knowledge/dcdc/dcdc_sr/dcdc_sr02/7451
- [13] INFINEON TECHNOLOGIES AG. www.infineon.com.
Mosfet/BSC070N10NS5 [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BSC070N10NS5-DataSheet-v02_02-EN.pdf?fileId=5546d4624a0bf290014a0fc62d9d6b3c
- [14] CHRIS GLASER, TEXAS INSTRUMENTS. www.electronicdesign.com.
 Power Management [online]. 2015 [cit. 2021]. Dostupné z:
<https://www.electronicdesign.com/power-management/article/21801119/does-inductor-ripplecurrent-percentage-still-matter-in-lowpower-stepdown-converters>
- [15] WÜRTH ELEKTRONIK EISOS GMBH & CO. KG. www.we-online.de.
Katalog/Datasheet/74437529203470 [online]. 2020 [cit. 2021].
 Dostupné z: <https://www.we-online.de/katalog/datasheet/74437529203470.pdf>
- [16] INFINEON TECHNOLOGIES AG. www.infineon.com.
Mosfet/BSC100N06LS3 G [online]. [cit. 2021]. Dostupné z:
https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BSC100N06LS3-DS-v02_03-en.pdf?fileId=db3a30431ddc9372011ebb0823387fd7
- [17] ASPENCORE, INC. www.Electronics-Tutorials.ws.
 Home / DC Circuits / Voltage Sources [online]. [cit. 2020].
 Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/dccircuits/voltage-source.html>
- [18] KISCHKEL, JENS. PANASONIC INDUSTRY EUROPE GMBH.
www.actec.dk. *Lead acid battery* and its internal resistance [online]. 2019 [cit. 2020].
 Dostupné z: <https://actec.dk/media/documents/E4A527501A20.pdf>
- [19] ANALOG DEVICES, INC. www.analog.com. *Products/LTC4380* [online]. [cit. 2021].
 Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/lt8392.pdf>
- [20] INFINEON TECHNOLOGIES AG. www.infineon.com.
Mosfet/IPB107N20N3 G/datasheet [online]. [cit. 2021].

- Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC4380.pdf>
- [21] EDDLEMAN, DAN. ANALOG DEVICES, INC. *www.analog.com*. Technical Articles/LTspice: Models of ISO 7637-2 & ISO 16750-2 Transients [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/ltspice-models-of-iso-7637-2-iso-16750-2-transients.html>
- [22] ANALOG DEVICES, INC. *www.analog.com*. *Positive Linear Regulators (LDO)/LT3012* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3012fd.pdf>
- [23] ARDUINO. *www.arduino.cc*. *ARDUINO PRODUCTS/Arduino Nano* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/pmwiki.php?n=Main/ArduinoBoardNano>
- [24] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *www.microchip.com*. *Products/MCP4725* [online]. [cit. 2021]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22039d.pdf>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

MOSFET...Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
THT...Through-hole Technology
SMT...Surface-mount Technology
SMD...Surface-mount Device
DC...Direct current (jednosmerný prúd)
DP...filter typu dolná priepusť
DPS...doska plošného spoja
D...Drain
S...Source

Symboly:

U , U_{IN} , U_{OUT} ...napätie, vstupné napätie, výstupné napätie[V]
 ΔU_{OUT} ...zvlnenie výstupného napätia[V]
 U_L ...napätie indukované na cievke[V]
 U_F ...napätie na dióde v priepustnom smere[V]
 U_Z ...napätie zdroja[V]
 ΔU_{CAP} ...zvlnenie napätia spôsobené nabíjaním kapacity[V]
 ΔU_{ESR} ...zvlnenie napätia spôsobené vplyvom odporu ESR[V]
 U_{GS} ... napätie na hradle tranzistoru MOSFET[V]
 $U_{BR(DSS)}$...prierazné napätie kanálu tranzistoru MOSFET[V]
 I , I_{IN} , I_{OUT} ...prúd, vstupný prúd, výstupný prúd[A]
 I_{INTVCC} ...prúd vnútorného zdroja obvodu LT8392[A]
 I_L, I_{SAT} ...prúd cievkou, saturačný prúd cievky[A]
 I_D ...prúd kanálu tranzistoru MOSFET[A]
 $\Delta I_L\%$...pomerné zvlnenie prúdu cievkou[%]
 I_{AV} , I_{RMS} ...priemerná, efektívna hodnota prúdu[A]
 P_{OUT} , P_{IN} ...výkon (vstupný, výstupný)[W]
 P_C , P_{DT} ...výkonové straty (vodivostné, dead-time)[W]
 P_D ...stratový výkon[W]
 η ...účinnosť[-]
 L ...indukčnosť[H]
 C ...kapacita[F]
 D ...strieda (činiteľ plnenia)[%]
 T ...perióda[s]
 t_{ON} , t_{OFF} ...doba zopnutia, doba vypnutia tranzistora[s]
 t_{DT} ...ochranná doba (dead-time)[s]

t_s ...čas ustálenia[s]
 r_D ...dynamický odpor[Ω]
 R_{DSon} ...statický odpor[Ω]
 R_Z ...zaťažovací odpor[Ω]
 R_s ...vnútorný sériový odpor zdroja[Ω]
 R_{SENSE} ...rezistor snímajúci veľkosť prúdu[Ω]
 R_{TRIM} ... maximálny odpor odporového trimra[Ω]
 f ...frekvencia spínania[Hz]
 Q_g ...celkový náboj hradla tranzistoru MOSFET[C]
 ESR ...ekvivalentný sériový odpor kondenzátoru[Ω]
 DCR ...odpor vinutia cievky[Ω]

ZOZNAM PRÍLOH

- PRÍLOHA A - TABUĽKA NAMERANÝCH HODNÔT NAPÄTÍ, PRÚDOV A ÚČINNOSTÍ ... 62**
PRÍLOHA B - SCHÉMA NAVRHNUTÉHO ZARIADENIA SAMOSTATNÝ LIST

Príloha A - Tabuľka nameraných hodnôt napätí, prúdov a účinností

Tabuľka 1 DC/DC menič s výstupným napätím 15 V

U_N [V]	6	12	24	36	48
U_{IN} [V]	6,11	11,95	23,90	36,00	48,20
I_{IN} [A]	8,64	5,27	2,63	1,76	1,35
U_{OUT} [V]	15,03	15,05	15,11	15,15	15,20
I_{OUT} [A]	3,16	4,00	4,01	3,98	4,02
η [%]	89,97	95,59	96,40	95,17	93,91

Tabuľka 2 DC/DC menič s výstupným napätím 30 V

U_N [V]	6	12	24	36	48
U_{IN} [V]	6,15	12,01	23,90	35,90	48,10
I_{IN} [A]	9,72	5,12	2,63	1,72	1,32
U_{OUT} [V]	29,90	30,00	30,10	30,20	30,30
I_{OUT} [A]	1,74	1,98	1,99	1,99	1,99
η [%]	87,03	96,60	95,29	97,33	94,97

Tabuľka 3 DC/DC menič s napájanými perifériami LDO regulátorom, s výstupným napätím meniča 15 V

U_N [V]	6	12	24	36	48
U_{IN} [V]	6,03	12,07	24,40	36,10	48,10
I_{IN} [A]	8,80	5,30	2,56	1,79	1,38
U_{OUT} [V]	15,08	15,17	15,11	15,17	15,20
I_{OUT} [A]	3,11	3,98	3,94	3,97	4,01
η [%]	89,29	94,38	95,31	93,20	91,83

Tabuľka 4 DC/DC menič s napájanými perifériami LDO regulátorom, s výstupným napätím meniča 30 V

U_N [V]	6	12	24	36	48
U_{IN} [V]	6,30	12,08	23,90	36,20	48,10
I_{IN} [A]	9,54	5,10	2,66	1,73	1,35
U_{OUT} [V]	29,90	29,90	30,20	30,10	30,30
I_{OUT} [A]	1,74	1,97	1,99	1,99	1,99
η [%]	86,56	95,61	94,53	95,65	92,86